

TRANSMISSIONSSONOGRAPHISCHE
UNTERSUCHUNGEN ZUR OSSIFIKATION
DER HANDWURZELKNOCHEN

BERND STIEFENHOFER

1984

*Duss
München*



Digitized by the Internet Archive
in 2026

https://archive.org/details/IA41554004_0008

Aus der Medizinischen Poliklinik der Universität München
Direktor : Prof. Dr. med. N. Zöllner

TRANSMISSIONSSONOGRAPHISCHE
UNTERSUCHUNGEN ZUR OSSIFIKATION
DER HANDWURZELKNOCHEN

Inaugural-Dissertation
zur Erlangung der Doktorwürde in der gesamten Medizin
an der Ludwig Maximilians-Universität zu München

vorgelegt von
Bernd Stiefenhofer

aus
München

Jahr
1984

Mit Genehmigung der Medizinischen Fakultät
der Universität München

Berichterstatter :	P.D. Dr. H. Kremer
Mitberichterstatter :	Prof. Dr. N. Zöllner
Dekan :	Prof. Dr. W. Spann
Tag der mündlichen Prüfung :	Dienstag, 20.11.1984

GLIEDERUNG

=====

A)	<u>EINFÜHRUNG</u>	Seite 1
B)	<u>DIE WICHTIGSTEN GRUNDBEGRIFFE</u>	
	1) Grundlagen der Ultraschallphysik	Seite 2
	2) Entwicklung der Transmissions- Ultraschallverfahren	Seite 4
	3) Allgemeine Definition der Transmissionssonographie	Seite 8
C)	<u>EIGENSCHAFTEN DER TRANSMISSIONSSONOGRAPHIE</u>	
	1) Physikalisches Prinzip	Seite 9
	2) Das Transmissionsbild	Seite 11
	3) Unterschiede zur Impulsechosonographie	Seite 12
D)	<u>DAS LABORGERÄT</u>	
	1) Aufbau	Seite 15
	2) Arbeitsweise	Seite 17
E)	<u>DIE METHODIK</u>	
	1) Einstellen des Geräts	Seite 19
	2) Untersuchungsvorgang	Seite 21
	3) Bildspeicherung und Bildwiedergabe	Seite 23
F)	<u>DIE PROBANDEN</u>	
	1) Geschlechtsverteilung	Seite 26
	2) Altersverteilung	Seite 29
	3) Besonderheiten	Seite 30

G)	<u>DER UNTERSUCHTE SKELETTABSCHNITT</u>	
1)	Das Handwurzelskelett	Seite 32
2)	Verknöcherung der Handwurzel	Seite 36
3)	Bestimmung des Skelettalters	Seite 41
H)	<u>DIE UNTERSUCHUNGSERGEBNISSE</u>	
1)	Transmissionssonographische HandÜbersichtsaufnahme	Seite 43
2)	Ausgewählte Aufnahmen von Proban- den mit unterschiedlichem Alter	Seite 49
3)	Vergleich von Transmissionsauf- nahmen mit Röntgenbildern	Seite 74
I)	<u>DISKUSSION</u>	Seite 92
K)	<u>ZUSAMMENFASSUNG</u>	Seite 97
L)	<u>LITERATURVERZEICHNIS</u>	Seite 101

Mit Freude und Dank

meinen Eltern gewidmet.

A) EINFÜHRUNG

Seit einigen Jahren gibt es die Möglichkeit, mit einem neu entwickelten Ultraschall-Verfahren Gewebeschichtaufnahmen des menschlichen Körpers anzufertigen. Die betreffenden Gerätetypen arbeiten dabei nach dem Prinzip der Transmissionssonographie und bilden sowohl Weichteile als auch Knochen ab.

Diese Arbeit befasst sich mit der transmissionssonographischen Darstellung des kindlichen Handwurzelskeletts, wobei folgende Fragen berücksichtigt wurden:

- Welche Strukturen werden bei den Handaufnahmen bei Kindern abgebildet?
- Inwieweit lassen sich die knöchernen Strukturen des kindlichen Handwurzelskeletts beurteilen?
- Gibt es eine Altersgrenze für den Einsatz der Transmissionssonographie zur Darstellung der Handwurzelemente?
- Kann eine Aussage über den Beginn und den Verlauf der Ossifikation im Handwurzelbereich gemacht werden?
- Kann mit Hilfe von Transmissionsaufnahmen der Handwurzel das ungefähre Skeletalter angegeben werden?

Die Untersuchungen begannen im Januar 1982 und wurden in der Abteilung Angewandte Optik der Gesellschaft für Strahlen- und Umweltforschung in Neuherberg, einer Großforschungseinrichtung des Bundes und des Landes Bayern, durchgeführt. Der experimentelle Teil der Studie konnte im Dezember 1982 abgeschlossen werden, während die schriftliche Ausarbeitung im Laufe des Jahres 1983 erfolgte. Die wesentlichen Untersuchungsergebnisse wurden bereits als Kurzreferate bei Ultraschallkongressen vorgetragen.

B) DIE WICHTIGSTEN GRUNDBEGRIFFE

In diesem Kapitel wird ein kurzer Überblick über die wichtigsten Daten und grundlegenden Fakten gegeben, die zum Verständnis der Vorgänge bei der Transmissionssonographie erforderlich sind.

1) Grundlagen der Ultraschallphysik

Unter Schall versteht man ein mechanisches Wellenfeld, bei dem Materieteilchen um ihre Ruhelage schwingen. Um die Schwingungsvorgänge zu beschreiben, bedient man sich unter anderem der Größen Frequenz f , Ausbreitungsgeschwindigkeit c und Wellenlänge λ . Die Frequenz f gibt die Zahl der Schwingungen pro Sekunde in Hertz (Hz) an. Das physikalisch kontinuierliche Schallspektrum umfaßt unter anderem den menschlich hörbaren Schall (von ca. 20 Hz bis ca. 20 kHz) und den Ultraschall (mehr als 20 kHz). Die Ausbreitungsgeschwindigkeit c wird durch die Eigenschaften des Ausbreitungsmediums bestimmt. In Luft beträgt c ungefähr 330 m/s und in Wasser bei 20° Celsius etwa 1480 m/s.

Aus den beiden Größen c und f kann mit Hilfe der Beziehung $\lambda = c/f$ die Wellenlänge λ errechnet werden. Dabei gilt für die Ausbreitung in einem bestimmten Medium: mit $c = \text{konst.}$ kann jeder Frequenz f genau eine Wellenlänge λ zugeordnet werden.

Die Reichweite in einem bestimmten Medium wird einerseits durch die Feldintensität bestimmt, andererseits durch die Dämpfungseigenschaften des Mediums: je kleiner die Intensität bzw. je größer die Dämpfung, umso geringer ist die Reichweite.

In Luft zum Beispiel wird die Ultraschallausbreitung so stark gedämpft, daß sich Ultraschall bei Frequen-

zen der Größenordnung MHz - wie er in der Medizin zu diagnostischen Zwecken eingesetzt wird - nur im Millimeterbereich ausbreiten kann. In Wasser dagegen sind die Dämpfungsvorgänge wesentlich kleiner, so daß hier die Reichweite bei gleicher Intensität einige Meter beträgt. Auf eine ausführliche Darstellung der Vorgänge bei der Ausbreitung von Ultraschall wird hier bewußt verzichtet und dafür das Studium der entsprechenden physikalischen oder medizinischen Literatur empfohlen (Lit.: 09; 13; 25).

Die Grundlagen für die heute gebräuchlichen Ultraschallgeräte beruhen auf den von Pierre und Jaques Curie 1880 gewonnenen Erkenntnisse über den sogenannten *piezoelektrischen Effekt*. Darunter versteht man die Ladungstrennung in bestimmten Kristallen unter mechanischer Beanspruchung. Setzt man einen derartigen Kristall zum Beispiel abwechselnd unter Druck und Zug, so entsteht eine abwechselnde Umverteilung der Ladungen. Wo bei Druck positive Ladungen nachweisbar sind, treten bei Zug negative Ladungen auf und umgekehrt. Das bedeutet, daß ein äußeres mechanisches Wechselfeld - wie zum Beispiel ein Ultraschallfeld - ein entsprechendes elektrisches Wechselfeld gleicher Frequenz im Kristall erzeugt.

Auf dieser Tatsache beruht die Arbeitsweise vieler Empfänger, mit denen Ultraschall nachgewiesen und gemessen werden kann. Als piezoelektrische Materialien kommen natürliche Quarzkristalle in Betracht. Technische Verwendung finden aber hauptsächlich keramische Materialien wie zum Beispiel Blei-Zirkonat-Titanat, deren Frequenzbereich bis an die Grenze des Ultraschallspektrums von etwa 500 MHz reicht (Lit.: 09).

Um ein Ultraschallfeld zu erzeugen, nutzt man den sogenannten umgekehrten piezoelektrischen Effekt. Die Einwirkung eines hochfrequenten elektrischen Wechselfeldes auf einen geeigneten Wandler versetzt diesen in entsprechende gleichfrequente mechanische Schwingung. Damit kann Ultraschall jeder gewünschten Frequenz erzeugt werden.

In der Medizin arbeiten die meisten Geräte nach dem Impuls - Echo - Verfahren, bei dem ein piezoelektrischer Wandler als Sender und Empfänger dient. Der Ultraschall wird dabei in kurzen Impulsen abgegeben und in den Sendepausen nimmt der Wandler die aus dem Organ reflektierten Ultraschallechos auf (Lit.: 03). Beim Verfahren der Transmissionssonographie dagegen sind Sender und Empfänger räumlich getrennt, der Ultraschall kann kontinuierlich oder gepulst abgegeben werden. Die Vorgänge für die Erzeugung und den Empfang des Ultraschallfeldes beruhen jedoch ebenfalls auf dem piezoelektrischen Effekt beziehungsweise dessen Umkehrung.

2) Entwicklung der Transmissions-Ultraschallverfahren

Der folgende Abschnitt, der sich inhaltlich auf Arbeiten von P. N. T. Wells (Lit.: 23, 24) stützt, gibt eine Übersicht über die Entwicklung der Transmissionsverfahren anhand der wesentlichen Ergebnisse verschiedener Arbeitsgruppen.

a) Frühe Arbeiten

Die Entwicklung der Transmissionsverfahren für medizinischen Einsatz begann etwa ab den Vierziger Jahren dieses Jahrhunderts. Zu Anfang hoffte man insbesondere

darauf, daß sich mit dieser Methode krankhafte Veränderungen des Gehirns erfassen ließen.

Dussik et al. (1947) konstruieren einen Ultraschallscanner, bei dem ein Feld durch den Kopf des Patienten geschickt und von einem dahinterliegenden Empfänger abgetastet wurde. Das Bild schien intrazerebrale Strukturen, speziell die Ventrikel, wiederzugeben (aus Lit.: 23).

Ballantine et al. (1950) verfolgten die gleiche Idee mit einem ähnlichen Gerät, das von Hueter und Bolt (1951) ausführlich beschrieben wurde.

Güttner et al. (1952) zeigten jedoch, daß die abgebildeten Strukturen nicht von den Ventrikeln, sondern vielmehr von den knöchernen Schädelanteilen hervorgerufen werden (aus Lit.: 23).

Horn und Robinson (1956) schlugen eine Methode zur Einschätzung von Frakturen vor, bei der gleichzeitig Longitudinal- und Transversalwellen eingesetzt wurden. Nach Kossoff (1975) ist diese Methode im klinischen Einsatz wegen der vielfachen Streuungsvorgänge im Weichteilgewebe um den Knochen ungeeignet (aus Lit.: 23).

Crawford et al. (1959) berichteten vom Zusammenhang zwischen Ultraschallschwächung durch den menschlichen Thorax und der Bewegung intrathorakaler Strukturen (aus Lit.: 23).

Smyth et al. (1963) konstruierten einen Ultraschall-Bildwandler, dessen Empfänger sowohl für reflektierten als auch für transmittierten Ultraschall eingesetzt werden konnte. Obwohl es eine Reihe von klinischen Einsatzmöglichkeiten gäbe, hat diese Methode bisher noch keine Verbreitung gefunden, da die dabei erhaltenen Bilder aufgrund von Vielfachreflexionen und stehenden Wellen unbrauchbare Ergebnisse liefern (aus Lit.: 23).

Kossoff und Sharpe (1966) gelang der Nachweis von Gas in der Zahnhöhle bei degenerativer Pulpitis (aus Lit.: 23).

Hamlet und Reid (1972) berichteten darüber, wie ein 3,2 MHz - Schallfeld durch die anatomischen Strukturen des Halses beeinflusst wird (aus Lit.: 23).

Holasek et al. (1973) nahmen an, daß ein Gewebe durch typische Abschwächungs-Frequenz-Charakteristika identifiziert werden könnte und daß diese Daten schnell und automatisch mit transmittiertem, gepulstem Ultraschall erhalten werden könnten (aus Lit.: 23).

b) Abtastende Zeilensysteme

Green et al. (1974) entwickelten ein Ultraschallgerät (Lit.: 06), mit dem sie real-time Transmissionsbilder erhielten (englisch : Orthographic Transmission Imaging). Gepulster Ultraschall von 6 μ sec Dauer und einer Frequenz von 2 MHz breitet sich in einem Wasserreservoir aus und wird vom Objekt gestreut und abgeschwächt. Die anschließende Intensitätsmessung erfolgt mit einem piezoelektrischen Zeilenempfänger (Lit.: 05). Dabei werden durch die Verwendung von gepulstem Ultraschall die sonst durch Vielfachreflexion und stehenden Wellen auftretenden Interferenzerscheinungen stark reduziert (Lit.: 08). Durch Variieren der Lage der Schärfenebene können hierbei verschiedene Abbildungsebenen im Patienten eingestellt werden (Lit.: 20).

Marich et al. (1975) wies auf ermutigende in-vitro-Ergebnisse mit diesem Gerät hin. Hierbei entstanden Bilder von entnommenen Organen wie Leber, Niere, Milz und Gebärmutter (Lit.: 14).

Zatz et al. (1975) berichtete in der gleichen Arbeit von vorläufigen in-vivo-Ergebnissen bei Erwachsenen (Lit.: 26).

c) Verzögerungsspektrometrie

Heyser und le Croissette (1974) verfolgten eine Methode, bei der das Untersuchungsobjekt von einem Ultraschallfeld durchdrungen wird, dessen Frequenz sich linear mit der Zeit ändert, so daß jede einzelne Frequenz eine Funktion der Sendezeit ist. Für eine vorgegebene Objektdurchtrittszeit ergibt sich somit eine konstante Differenz zwischen Sende- und Empfangsfrequenz. Da alle Feldanteile, die das Objekt orthograd durchdringen, die gleiche Laufzeitverlängerung erfahren, kann ein Rechner von den jeweiligen Feldern gleicher Frequenz ein Monitorbild aufbauen (Lit.: 10 und aus Lit.: 23).

d) Computerisierte Ultraschalltomographie

Auch der Möglichkeit, mit Ultraschall ähnliche Bilder zu erzeugen wie es mit der Röntgen-Computer-Tomographie gelingt, wurde bereits nachgegangen.

Greenleaf et al. (1974) beschrieben eine experimentelle Anordnung, die diese Möglichkeit testen sollte. Die damit erhaltenen Bilder waren interessant aber nicht Überzeugend (aus Lit.: 23).

3) Allgemeine Definition der Transmissionssonographie

Bei der Transmissionssonographie (englisch : Orthographic Transmission Imaging) wird ein zu untersuchendes Objekt von einem Ultraschallfeld durchdrungen. Die Wechselwirkungen zwischen den Ultraschallwellen und dem Objekt verändern das Schallfeld in charakteristischer Weise, indem es gegenüber der vom Sender erzeugten Intensität mehr oder weniger geschwächt wird. Die Intensitätsverteilung des aus dem Objekt austretenden Schallfelds wird (in der Regel auf einem Fernseh-Monitor) optisch dargestellt. Aus diesem Bild werden dann Rückschlüsse auf die durchdrungenen Strukturen gezogen.

C) EIGENSCHAFTEN DER TRANSMISSIONSSONOGRAPHIE

In der Medizin dient die Transmissionssonographie als nicht-invasive Untersuchungsmethode zur Darstellung anatomischer Strukturen mit Hilfe von gewebedurchdringendem Ultraschall.

1) Physikalisches Prinzip

Im apparativen Aufbau läßt sich die Transmissions-sonographie mit der Diaprojektion vergleichen:

Von einer Lichtquelle bzw. Schallquelle wird ein Feld erzeugt, welches durch optische Elemente (Linsen) so beeinflußt wird, daß es das Objekt in geeigneter Weise durchdringt und zu einer Projektion der Strukturen im Objekt führt (siehe Abbildung 1).

Die Übereinstimmung bezüglich der Feldeigenschaften beider Verfahren besteht in den folgenden Punkten:

- Das erzeugte Schwingungsfeld breitet sich entlang einer räumlichen Mittelachse aus.
- Diese Mittelachse muß so ausgerichtet sein, daß die optischen Elemente und das Objekt in geeigneter Weise durchdrungen werden.
- Die Abbildungsebene im Objekt liegt senkrecht zur optischen Achse.
- Als Wechselwirkung treten dabei Reflexion, Streuung und Absorption auf.
- Der austretende, transmittierte Feldanteil enthält Informationen über die Objektstrukturen.

Die genaue Darstellung des Aufbaus und der Arbeitsweise des Transmissionssonographiegeräts folgt im nächsten Kapitel.

TRANSMISSIONS-
SONOGRAPHIE

DIAPOSITIV-
PROJEKTION

Ultraschall-
Sender

normale
Glühlampe

Körperteil

Diapositiv

Ultraschall-
detektor und
Fernsehmonitor

Leinwand

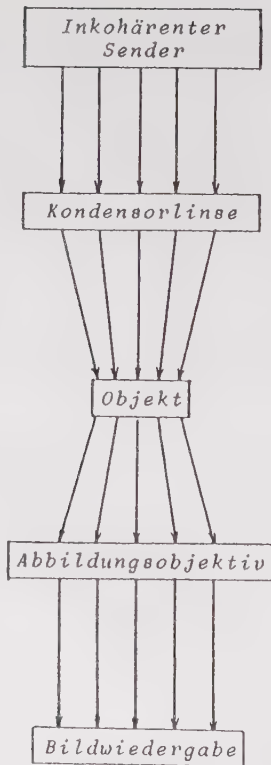


Abbildung 1 : Ähnlichkeiten im physikalischen Prinzip zwischen Transmissionssonographie und Diaprojektion.

2) Das Transmissions-Bild

Die Bilderzeugung bei der Transmissionssonographie beruht auf der zeilenweisen Abtastung der Ultraschallintensität hinter dem Objekt und Umsetzung dieser Meßwerte in entsprechende Graustufen der Monitorbildpunkte. Die Skala umfaßt dabei Helligkeitsstufen von schwarz (minimale Feldintensität) bis weiß (maximale Feldintensität). Dadurch kann die vom Empfänger gemessene Intensitätsverteilung des Ultraschallfeldes als Helligkeitsverteilung am Monitor wiedergegeben werden.

Jedes organische Gewebe besitzt aufgrund von Vorgängen der Reflexion, Streuung und Absorption beim Durchtritt eines Ultraschallfeldes bestimmte Transmissions-eigenschaften. Die endgültige Schwächung der transmittierten Ultraschallintensität wird dann durch die jeweilige Gewebestruktur und Gewebedicke bestimmt. Liegen mehrere verschiedene Gewebe in einer Ebene hintereinander, so wird die Gesamtintensität um die Summe der den einzelnen Geweben entsprechenden Schwächungsbeträge vermindert. Daher ist die Helligkeit des einzelnen Bildpunktes kein absolutes Maß, sondern ergibt sich als relative Größe in Proportion zu den jeweiligen abgebildeten Geweben. Aus früheren Untersuchungen am gleichen Gerät (Lit.: 12) hatte sich bereits ergeben, daß bei jeweils geeigneter Lage des Untersuchungsobjektes im Ultraschallfeld folgende Strukturen mit zunehmender Helligkeit im Transmissionsbild erkannt werden können:

<i>schwarz</i>	:	<i>Knochen</i>
<i>dunkelgrau</i>	:	<i>Sehnen, Gefäße</i>
<i>mittelgrau</i>	:	<i>Bindegewebe, Knorpel</i>
<i>hellgrau</i>	:	<i>Muskulatur</i>

Dabei gilt, daß die Darstellung einer bestimmten Struktur im Transmissions-Bild umso deutlicher ist, je größer die Feldschwächung durch diese Struktur im Vergleich zur Umgebung ist. Dann nämlich bildet sie sich kontrastreich ab und läßt sich gut gegen das umliegende Gewebe abgrenzen. Ausführlich werden die abgebildeten Strukturen in Kapitel H (Die Untersuchungsergebnisse) besprochen.

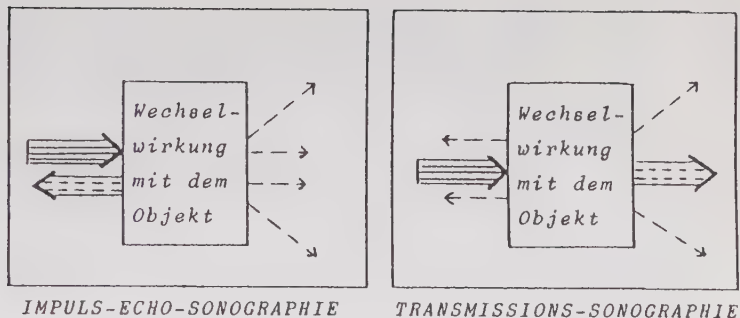
3) Unterschiede zur Impuls - Echo - Sonographie

Kurzdefinition:

Bei der Impuls-Echo-Sonographie dringt ein gepulstes Ultraschallfeld in das zu untersuchende Objekt ein. Aus der Intensität und der Impulslaufzeit der reflektierten Ultraschallwellen wird ein Tiefenschnittbild am Monitor als Graustufenbild abgebildet.

Sowohl in der Feldgeometrie und im Feldverlauf als auch in der Art und der Verarbeitung der gemessenen Feldgrößen bestehen zwischen der Impulsechosonographie und der Transmissionssonographie wesentliche Unterschiede (siehe Abbildung 2).

Die Impuls-Echo-Sonographie verarbeitet von dem in das Objekt eingedrungenen Feld nur den Anteil der *reflektierten* Wellen. Aus diesen wird entsprechend der Laufzeit der Einzelimpulse eine Schnittebene im Objekt abgebildet, die sich *in Richtung* des einfallenden Ultraschallfeldes erstreckt. Die für die Bildgewinnung ausschlaggebende Information ist dabei der *Grad der Reflexion* der Ultraschallwellen an Übergängen von Geweben unterschiedlicher Ultraschalldichte.



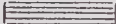
-  Ultraschallwellen vom Sender
-  Ultraschallwellen zum Empfänger
-  nicht bildaufbauende Ultraschallwellen

Abbildung 2 : Für den Bildaufbau relevanter
Verlauf der Ultraschallwellen

Die Transmissionssonographie dagegen verarbeitet aus dem Ultraschallfeld nur den um Reflexion, Streuung und Absorption verminderten, transmittierten Wellenanteil (siehe Abbildung oben). Dieser führt zur Abbildung einer Schärfenebene, die senkrecht zur Ultraschallrichtung liegt. Als Information für den Bildaufbau dient der Grad der Schwächung des Feldes durch das Objekt.

Auch bei der Art der Bildinformation bestehen Unterschiede zwischen beiden Verfahren:

Die Impulsechosonographie eignet sich zur Darstellung und Differenzierung von Weichteilen aufgrund von gewebstypischen Binnenechos. Dabei werden die Reflexionseigenschaften jedes einzelnen Organs wiedergegeben. Strukturen wie Knochen oder Luft, wo sich Ultraschall

so gut wie nicht ausbreitet, stellen bei diesem Verfahren eine Barriere dar, die eine Organuntersuchung auf den davorliegenden Bereich beschränkt.

Anders verhält es sich bei der Transmissionssonographie, bei der die Feldintensität für den einzelnen Bildpunkt eine Funktion der Abschwächung durch das insgesamt durchdrungene Gewebe darstellt. Von allen, im Strahlengang hintereinander liegenden Strukturen dominiert in jedem Fall diejenige mit der höchsten Absorptionsdichte, so daß die Darstellbarkeit bestimmter Organstrukturen dadurch bestimmt wird, ob diese ausschließlich gegen schwächer absorbierendes Gewebe der Umgebung abgebildet werden können. Daher eignet sich dieses Verfahren besonders gut zur Abbildung der Umrisse von stark absorbierenden Organen wie zum Beispiel Knochen.

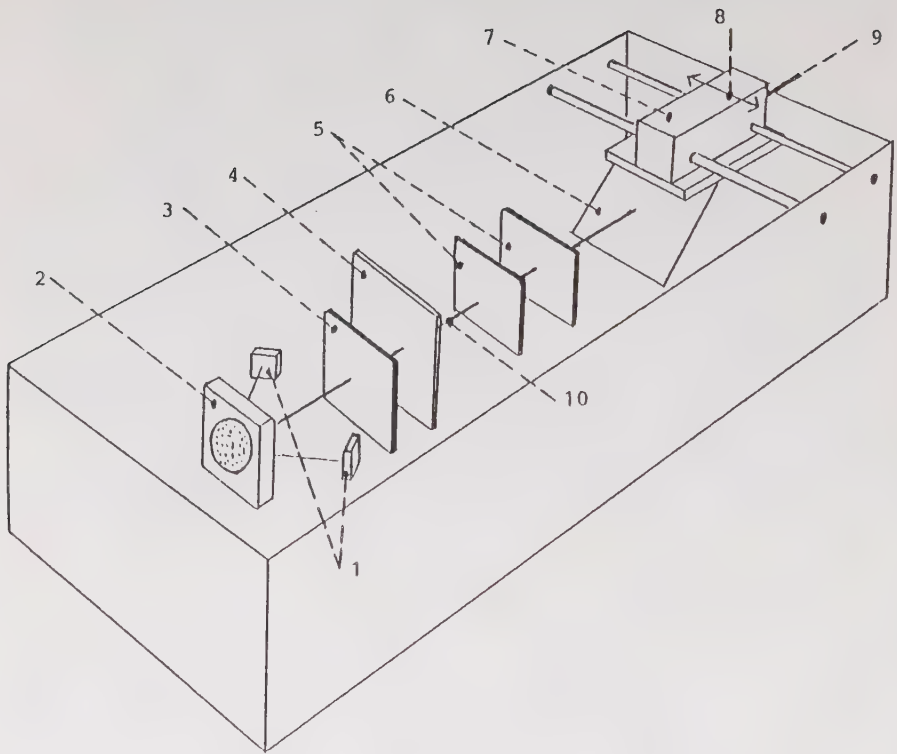
D) DAS LABORGERÄT

Die Untersuchungen wurden mit einem Laboraufbau eines Transmissionssonographiegerätes durchgeführt, welches in der Gesellschaft für Strahlen- und Umweltforschung in Neuherberg, Abteilung für Angewandte Optik, seit einigen Jahren entwickelt wird (Lit.: 01; 02).

Es ist bekannt, daß sich Ultraschall im Frequenzbereich von MHz in Luft nur wenige Millimeter, in Wasser dagegen über große Strecken ausbreitet. Deshalb wird bei dem o.g. Gerät ein Wasserbecken verwendet, in dem alle ultraschall-technischen Elemente untergebracht sind und in das auch der zu untersuchende Körperteil eingetaucht werden muß. Das Wasser dient dabei als Ausbreitungs- und Koppelungsmedium für den Ultraschall. Die einzelnen funktionellen Komponenten des Geräts gleichen zum Teil den aus der (Licht-) Optik bekannten Elementen, wobei sie hier an die speziellen Bedingungen des Ultraschalls angepaßt sind.

1) Aufbau

In Abbildung 3 ist das Laborgerät in einer vereinfachten Skizze wiedergegeben, wobei auf die Darstellung der an das Laborgerät angeschlossenen Verarbeitungselektronik (Erklärung im Text) verzichtet wurde. Als Schallgeber (1) dienen zwei piezokeramische Wandler, die mit einer Frequenz von wahlweise 1,6 oder 2,0 MHz die Streukammer (2) kontinuierlich beschallen. Das von dort reflektierte Schallfeld trifft auf eine ultraschalldurchlässige Kunststoff-Kondensorlinse (3). Die in Transmissionsrichtung verschiebbare Objektplatte (4) dient nur als Anlegefläche für den zu untersuchenden Körperteil und beeinflußt das Schallfeld nicht. Das Abbildungsobjektiv (5) besteht aus zwei asphärisch geformten, ebenfalls ultraschall-



- 1 Piezoelektrisches Schallgeberpaar
- 2 Streukammer mit Wasserzu- und -ablauf
- 3 Kondensorlinse
- 4 Objektplatte im Bereich der Schärfenebene
- 5 Abbildungsobjektiv (Linsenkombination)
- 6 45° - Umlenkspiegel
- 7 Piezoelektrischer Empfänger
- 8 Bewegungsebene des Empfängers
- 9 Verbindungskabel zum Bildspeichergerät
- 10 Optische Zentralachse

Abbildung 3: Vereinfachte Skizze des Laborgeräts (modifiziert nach H. Brettel et al. (Lit.: 02)).

durchlässigen Kunststofflinsen, die durch die Kombination ihrer Grenzflächen weitgehend gegen Bildfeldwölbung und Öffnungsfehler korrigieren. Der dahinter in 45° zur optischen Achse angebrachte Umlenkspiegel (6) reflektiert das Feld zu dem an der Wasseroberfläche liegenden, mechanisch bewegten (8) Empfänger (7). Dieser besteht aus einer Zeile von 200 piezokeramischen Einzeldetektoren, die direkten Kontakt zur Wasseroberfläche haben. An den Empfänger angeschlossen (9) ist ein Bildspeichergerät, von dem aus die Bildwiedergabe an einem Fernsehmonitor erfolgt.

2) Arbeitsweise

Erst durch die Entwicklung einer geeigneten, inkohärenten Ultraschallquelle konnte eine nahezu interferenzfreie Bildqualität erreicht werden (Lit.: 15; 16; 17). Hierzu werden in der Streukammer einige tausend Streuteilchen ständig durch eine Wasserströmung in Bewegung gehalten. Das vom Sender kommende Ultraschallfeld trifft auf die bewegten Teilchen und wird von diesen als inkohärentes Feld reflektiert. Die Kondensorlinse bewirkt, daß das dahinterliegende Objekt von einem gleichförmigen Ultraschallfeld durchsetzt wird. Reflexion, Streuung und Absorption von Ultraschallwellen im Objekt führen dazu, daß der austretende Feldanteil schwächer als der eintretende ist. Der für den Bildaufbau maßgebliche Feldanteil tritt durch das Abbildungsobjektiv und wird vom Umlenkspiegel an die Wasseroberfläche unter dem Empfänger reflektiert. Dieser wird während der ganzen Untersuchungszeit von einem Motor parallel zur Wasseroberfläche über die gewählte Bildfeldbreite hin und herbewegt. Als Meßgröße dient die Intensitätsverteilung des

empfangenen Ultraschalls. Sie wird von jedem der 200 Einzeldetektoren in elektrische Wechselspannungen umgewandelt, anschließend verstärkt und in einem digitalen Bildspeichergerät abgelegt, an den ein Fernsehmonitor angeschlossen ist. Genaueres hierzu siehe in Kapitel E 3 (Bildspeicherung und Bildwiedergabe).

E) DIE METHODIK

1) Einstellen des Geräts

Um optimale und miteinander vergleichbare Untersuchungsergebnisse zu erhalten, war es erforderlich, eine Reihe von Vorbereitungen vor jeder Untersuchungsserie durchzuführen.

Wahl der Sendefrequenz

Vorangegangene Untersuchungen und zusätzlich noch angefertigte Vergleichsaufnahmen hatten zu der Erkenntnis geführt, daß zur Darstellung von Körperteilen mit geringer Schichtdicke wie der Hand die Verwendung der 2,0 MHz - Schallgeber zu einer besseren Bildqualität führt als der Einsatz der 1,6 MHz - Sender. Deshalb wurde für alle Untersuchungen nur ein Ultraschallfeld von 2,0 MHz verwendet.

Abgleichen der Verarbeitungselektronik

Um die Vergleichbarkeit aller Aufnahmen zu gewährleisten, wurde vor jeder Untersuchungsreihe eine Kennlinienbestimmung für jeden der 200 Einzeldetektoren durchgeführt. Dazu wurden bei leerer Objektebene Mehrfachmessungen der Einzelsignale der Detektorelemente bei sehr hoher Schallintensität durchgeführt. Mit den danach ermittelten Kennlinien wurden bei den folgenden Untersuchungen alle Meßwerte der jeweiligen Detektoren abgeglichen und korrigiert.

Ermittlung der Schärfenebene

Sodann wurde die Schärfenebene mit einem Testobjekt ermittelt:

Eine etwa 10 cm x 10 cm große, dünne Metallplatte mit vier Reihen unterschiedlich großer Löcher im Millimeterbereich wurde parallel zu den Linsen in das Schallfeld gehalten und so lange hin und her bewegt, bis sich die Löcher scharf auf dem Monitorbild darstellen. Diese Position wurde an der Führungsschiene markiert.

Anbringen der Objektplatte

Die Objektplatte wurde für jeden Probanden so montiert, daß sie in dem für die zu untersuchende Hand nötigen Abstand von 1 bis 2 Zentimetern zur vorher ermittelten Schärfenebene an der Führungsschiene festgestellt wurde. Damit wurde erreicht, daß sich dann die Ebene der Handwurzelknochen bereits ziemlich genau in der Ebene der schärfsten Abbildung befand. Die Verwendung der Objektplatte war erforderlich, um zu verhindern, daß die Probanden ihre Hand während des Aufnahmevorgangs unkontrolliert im Schallfeld bewegten. Vor allem kleine Kinder konnten ihre Hand nicht für die Dauer von 8 - 10 Sekunden pro Bildaufbau ruhig halten. Bewegte sich jedoch die Hand während des Abbildungsvorganges, so entstand entweder ein Zerrbild, oder es wurden verschiedene Ebenen der Hand scharf abgebildet. In beiden Fällen wären die dann erhaltenen Bilder nicht für eine Auswertung geeignet gewesen.

2) Untersuchungsvorgang

Bei der eigentlichen Untersuchung wurde die Hand des Probanden wiederholt auf dem Fernsehmonitor dargestellt und währenddessen in die beste Position gebracht. Wenn die Wiedergabe am Monitor zufriedenstellend war, so wurde die kontinuierliche Bilderneuerung abgebrochen. Im einzelnen waren folgende Schritte durchzuführen.

Vorbereiten der Hand zur Untersuchung

Zur Darstellung des Handwurzelbereichs mußten die Kinder immer den ganzen Arm ins Wasser eintauchen, um die Hand richtig auf die Objektplatte legen zu können. Dabei wurde darauf geachtet, daß keine Luftbläschen an der Handoberfläche haften bleiben, da diese durch Ultraschallreflexion störende schwarze Bildpunkte ergeben hätten.

Einregulieren des Intensitätsoptimums

Wie sich immer wieder zeigte, konnte keine Standard-Intensität für alle Untersuchungen festgelegt werden, da die Durchschallbarkeit der Hände bei den einzelnen Probanden individuell zu verschieden war. Daher wurde jeweils der Intensitätswert gewählt, bei dem sich die Weichteilgewebe um die Knochen hellgrau bis weiß darstellten (hoher Kontrast), ohne daß das Bild dabei überstrahlt wurde.

Einstellen der gewünschten Abbildungsebene

Die ruhig an der Objektplatte anliegende Hand wurde nun so lange mit dieser zusammen in Transmissions-

richtung verschoben, bis sich die Handwurzelknochen optimal scharf abbildeten.

Empirisch war es dabei für Bildqualität und Informationsgehalt ohne Bedeutung, ob die Transmissionsrichtung ventro-dorsal oder dorso-ventral war, sowie, ob sich die Objektplatte vor oder hinter der Hand befand. Somit waren folgende Untersuchungskonstellationen möglich:

<u>Transmissionsrichtung</u>	<u>Objektplatte</u>	
ventro - dorsal	vor der Hand	(1)
	hinter der Hand	(2)
dorso - ventral	vor der Hand	(3)
	hinter der Hand	(4)

Von diesen vier verschiedenen möglichen Anordnungen wurde jeweils die ausgewählt, die für den untersuchten Probanden am bequemsten war, wobei sich im Verlauf der Studie zeigte, daß die meisten Bilder nach den Anordnungen (1) und (4) entstanden.

Ermitteln der günstigsten Handhaltung

Es hatte sich gezeigt, daß es für die Darstellung der Handwurzelknochen speziell bei älteren Kindern am besten war, die Hand flach und mit gespreizten Fingern auf die Objektplatte aufzulegen. Dann nämlich wird der größte Teil der Knochenzwischenräume orthograd von den Ultraschallwellen getroffen und bildet sich somit ab. Dadurch werden die Knochen gegeneinander abgrenzbar.

Außerdem hatte sich herausgestellt, daß die Kinder die Hand wesentlich ruhiger auf der Objektplatte ruhen lassen, wenn sie diese flach und mit etwas Druck auflegen.

Im Einzelfall konnte es aber bei älteren Kindern auch vorkommen, daß bei einer leichten Hohlhandstellung die Abbildung der Knochen deutlicher wurde.

Nachregulieren der Schärfenebene

Wenn die Hand in der optimalen Stellung an der Objektplatte lag, wurde am Monitorbild noch einmal geprüft, ob die Ebene der Handwurzelknochen tatsächlich scharf zur Abbildung kam. Gegebenenfalls wurde wie oben beschrieben nachreguliert.

Unterbrechung des kontinuierlichen Bildneuaufbaus

Wenn sich die gewünschte Objektebene am Monitor scharf abbildete, wurde der Proband gebeten, seine Hand während des folgenden Bildaufbaus vollkommen ruhig zu halten.

Zeigte sich nach etwa 3/4 der daraufhin entstehenden Aufnahme, daß die Darstellung gut war, dann wurde durch Tastendruck der Bildaufbau noch bis zum Bildrand fortgesetzt und dann unterbrochen. Das zuletzt aufgenommene Bild blieb auf dem Monitor weiterhin sichtbar.

3) Bildspeicherung und Bildwiedergabe

Die unterschiedliche Intensitätsverteilung des Ultraschallfelds führte bei der kontinuierlichen Abtastung

des Bildfeldes durch die Ausnutzung des piezoelektrischen Effekts zu entsprechend ausgeprägten Spannungsamplituden in jedem der 200 Einzeldetektoren des Empfängers. Diese Signale wurden anschließend weiterverarbeitet und in einem Bildspeichergerät abgelegt. Bei jedem neuen Bilddurchlauf wurde die vorherige Information für den einzelnen Bildpunkt gelöscht und durch die aktuelle ersetzt (Aktualisierung). Wenn der Aufnahmeprozess beendet worden war, so befand sich nur die Information der letzten Bildaufzeichnung im Bildspeicher.

Vom Bildspeicher aus wurde der *Fernsehmonitor* gesteuert, der die aktuell aufgenommene Bildinformation als Graubild wiedergab. Am Monitor bestand die Möglichkeit, durch getrennte Regelung der Helligkeit und des Kontrasts die Bildwiedergabe so einzustellen, daß die abgebildeten Strukturen optimal zu erkennen waren. Zusätzlich konnte jedes Monitorbild wahlweise sowohl mit den ursprünglichen, als auch mit den inversen Helligkeitswerten wiedergegeben werden. Im Laufe der Zeit zeigte sich allerdings, daß es in der Regel besser gelang, die Originalbilder zu interpretieren, bei denen Knochen schwarz (intensitätsarm) und flüssigkeitsreiche Strukturen hellgrau (intensitätsreich) wiedergegeben wurden. Dabei handelt es sich aber wahrscheinlich eher um eine Frage der Gewöhnung.

Neben der Bildwiedergabe bestand auch die Möglichkeit der *Bildkonservierung*. Dazu konnte die gesamte Information für ein Bild vom Bildspeichergerät auf Computerdisketten übertragen werden. Damit war die Originalbildinformation beliebig abrufbar und konnte jederzeit über den Monitor wiedergegeben werden. Dies erfolgte zumindest einmal, und zwar wenn die Einzelbilder mit einem Dia- und/oder Negativfilm fotografiert wurden,

um einerseits für die Bildpräsentation vom Monitor unabhängig zu sein und um andererseits mehrere Aufnahmen desselben oder verschiedener Probanden direkt miteinander vergleichen zu können.

Aus technischen Gründen kam es während der Aufnahmen hin und wieder zum Ausfall einer oder mehrerer Detektorelemente. Dadurch fehlte die Bildinformation auf der ganzen entsprechenden Bildzeile. Dieser störende Zeilenausfall konnte mit einem entweder *manuell oder automatisch gesteuerten Korrekturprogramm* durch Helligkeitsabgleich mit der darüber und darunter liegenden Zeile ersetzt werden. Die Korrektur wurde dabei jedoch nur am Monitorbild vorgenommen, so daß alle Bilder unverändert mit ihrer Originalinformation auf den Disketten gespeichert blieben.

Insgesamt erwies sich die Bildkorrektur als eine vorteilhafte Maßnahme, da die meisten Bilder dadurch an Klarheit in der Darstellung gewannen.

F) DIE PROBANDEN

Entsprechend der Themenstellung wurden nur Kinder untersucht. Nach Aufklärung und Zustimmung der jeweiligen Eltern konnten zwischen Januar und Dezember 1982 von insgesamt 49 Probanden im Alter von 2 bis 16 Jahren über 200 Einzelaufnahmen des Handwurzelbereichs angefertigt werden.

1) Geschlechtsverteilung

Um unter anderem auch einen Vergleich der Ergebnisse zwischen männlichen und weiblichen Probanden vornehmen zu können, sollten etwa gleich viele Jungen und Mädchen untersucht werden. Am Ende ergab sich folgende Aufteilung:

Mädchen	26
Jungen	<u>23</u>
insgesamt	49

Die beiden Tabellen im Anschluß erlauben den Überblick über alle untersuchten Kinder. In Tabelle 1 sind alle Mädchen, in Tabelle 2 alle Jungen aufgelistet und zwar jeweils nach zunehmendem Alter am Untersuchungstag. Die einzelnen Spalten enthalten folgende Daten:

N	:	Nummer des Probanden zur Identifizierung der Bilder
A	:	Alter des Probanden am Untersuchungstag Die erste Ziffer gibt die Jahre, die zweite Ziffer die Monate an.
GD	:	Geburtsdatum (auf Monate gerundet)
UD	:	Untersuchungsdatum (auf Monate gerundet)
B	:	Anzahl der angefertigten Bilder
R	:	Vorliegen von Röntgenbildern (+ ja, - nein)

N	A	GD	UD	B	R
1	01.08	03/81	11/82	2	-
2	03.02	04/79	06/82	2	+
3	03.04	11/78	03/82	3	-
4	04.01	01/78	02/82	5	-
5	04.05	10/77	03/82	4	-
6	04.06	05/78	11/82	2	-
7	04.06	09/77	03/82	4	-
8	04.06	09/77	03/82	4	-
9	05.06	09/76	03/82	4	-
10	06.05	10/75	03/82	4	-
11	06.07	04/76	11/82	2	+
12	07.04	09/74	03/82	4	-
13	07.06	04/75	10/82	4	+
14	07/10	05/74	03/82	4	-
15	09.04	12/72	04/82	4	-
16	10.10	05/71	03/82	5	-
17	10.10	05/71	03/82	4	-
18	11.00	07/71	07/82	4	+
19	11.02	01/71	03/82	4	-
20	11.09	06/70	03/82	4	-
21	12.08	08/69	04/82	4	-
22	12.09	06/69	03/82	5	-
23	12.10	05/69	03/82	5	-
24	14.05	10/67	03/82	4	-
25	15.01	01/67	02/82	6	-
26	16.01	02/66	03/82	8	-

Tabelle 1 : *Überblick über die weiblichen Probanden
(Erläuterung im Text).*

N	A	GD	UD	B	R
1	01.10	05/80	03/82	10	-
2	02.05	10/79	03/82	1	-
3	02.06	05/80	11/82	3	+
4	03.07	08/78	03/82	2	-
5	03.07	08/78	03/82	4	-
6	04.00	03/78	03/82	5	-
7	04.00	03/78	03/82	6	-
8	04.08	03/78	11/82	3	+
9	05.05	11/76	04/82	3	-
10	06.04	11/75	03/82	3	-
11	06.11	04/75	03/82	3	-
12	07.08	12/74	08/82	6	-
13	08.01	09/74	10/82	3	+
14	08.04	11/73	03/82	7	-
15	08.11	04/73	03/82	4	-
16	09.06	09/72	03/82	4	-
17	10.03	12/71	03/82	4	-
18	11.04	11/70	03/82	6	-
19	11.04	02/71	06/82	4	+
20	12.01	05/70	06/82	4	+
21	12.06	09/69	03/82	5	-
22	12.09	06/69	03/82	4	-
23	13.08	10/68	06/82	4	+

Tabelle 2 : *Überblick über die männlichen Probanden*
(Erläuterung im Text)

2) Altersverteilung

Die folgende Fallzahl - Alters - Übersicht schlüsselt die Probanden nach Geschlecht getrennt in Altersgruppen auf (Abb. 4). Die Gruppenbreite beträgt 12 Monate und erfaßt immer alle Kinder mit der gleichen Anzahl von vollendeten Lebensjahren, wobei die Zuordnung nach dem Alter erfolgte, das in den Tabellen 1 und 2 jeweils angegeben ist.

Alter (J)	01-02	02-03	03-04	04-05	05-06	06-07	07-08	08-09
Mädchen	1	0	2	5	1	2	3	0
Jungen	1	2	2	3	1	2	1	3
gesamt	2	2	4	8	2	4	4	3

Alter (J)	09-10	10-11	11-12	12-13	13-14	14-15	15-16	16-17
Mädchen	1	2	3	3	0	1	1	1
Jungen	1	1	2	3	1	0	0	0
gesamt	2	3	5	6	1	1	1	1

Abbildung 4 : Fallzahl - Alters - Übersicht

Physiologische und gerätetechnische Bedingungen hatten erwarten lassen, daß nicht bei allen Altersstufen brauchbare Transmissionsaufnahmen entstehen würden. Daher ergaben sich für die Auswahl der Probanden folgende Beschränkungen:

Obere Altersgrenze

Vorüberlegungen und erste Aufnahmen zeigten bald, daß die Darstellung speziell des Handwurzelbereichs nur solange sinnvoll ist, wie der Grad der Ossifikation des Handwurzelskeletts noch eine Abgrenzung der Einzelknochen erlaubt. Nach dem Studium geeigneter Röntgenaufnahmen von Kinderhänden wurde diese obere Grenze bei etwa 12 Jahren angesetzt. Zur Absicherung sollten jedoch noch einige ältere Kinder untersucht werden, weshalb das Höchstalter letztendlich bei 16 Jahren lag.

Untere Altersgrenze

Hierbei erwies sich vor allem die lange Bildaufbauzeit als Schranke. Da die Untersuchungen mit einem guten Bild nur abgeschlossen werden konnten, wenn das Kind Hand und Finger während eines kompletten Bildaufbaus vollkommen ruhig hielt, kamen nur Probanden in Frage, die zur entsprechenden Mitarbeit fähig waren. Aus diesem Grund lag die untere Altersgrenze bei knapp unter 2 Jahren.

Die Möglichkeit, bereits bei Neugeborenen, Säuglingen und Kleinkindern unter 2 Jahren transmissionsonographische Bilder anzufertigen, wird im wesentlichen davon abhängen, ob es gelingt, die Bildaufbauzeit noch wesentlich zu verkürzen.

3) Besonderheiten

Um mögliche Unterschiede in der Erfäßbarkeit der Skelettstrukturen zu belegen oder auszuschließen, sollte bei einem Teil der Probanden ein Vergleich zwischen transmissionsonographischen Aufnahmen

und entsprechenden Röntgenbildern vorgenommen werden.

Die Verteilung der 10 Fälle, in denen diese Gegenüberstellung möglich war, zeigt die folgende Vierfeldertafel:

	<i>Röntgenbilder vorhanden</i>	
	<i>ja</i>	<i>nein</i>
<i>Mädchen</i>	4	22
<i>Jungen</i>	6	17
<i>zusammen</i>	10	39

Abbildung 5 : *Probanden mit und ohne Röntgenbilder*

Da es ethisch nicht vertretbar gewesen wäre, bei den untersuchten Kindern nur aus wissenschaftlichem Interesse eine Röntgenaufnahme der Hand anfertigen zu lassen, war es notwendig, solche Kinder in die Studie aufzunehmen, von deren Hand bereits ein aktuelles Röntgenbild aus medizinischer Indikation (Fraktur im Handgelenksbereich, Abklärung einer Wachstumsstörung) vorlag.

Die Ergebnisse der Gegenüberstellung beider Methoden werden im Kapitel II 3) (Vergleich von Transmissionsaufnahmen mit Röntgenbildern) ausführlich dargestellt.

G) DER UNTERSUCHTE SKELETTABSCHNITT

Dieses Kapitel enthält die anatomischen, entwicklungsphysiologischen und röntgenologischen Grundlagen für die Beurteilung eines Handwurzelstatus. Im Kapitel II) (Die Untersuchungsergebnisse) finden diese Grundlagen ihre praktische Anwendung.

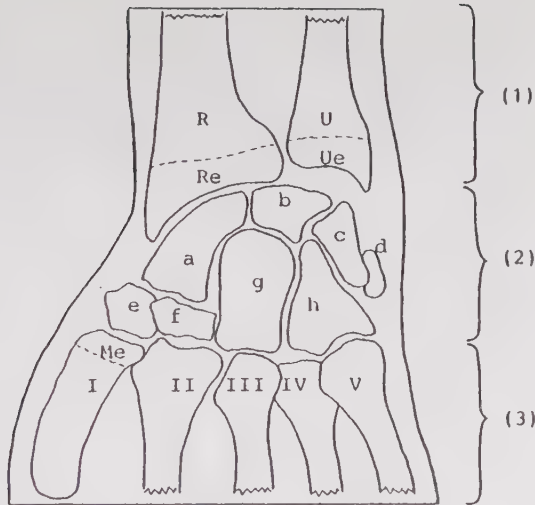
1) Das Handwurzelskelett

Die Zielregion der Untersuchungen waren die knöchernen Strukturen im Bereich des Übergangs vom Unterarm zur Mittelhand, die sogenannte Handwurzel, so daß sich folgende drei Abschnitte ergeben:

die Enden der beiden Unterarmknochen,
die acht Handwurzelknochen im eigentlichen Sinn und
die fünf proximalen Enden der Mittelhandknochen.

Die anatomischen Grundlagen sind dem Lehrbuch nach Frick, Leonhardt, Stark (spezielle Anatomie des Unterarms und der Hand. Lit.: 04) beziehungsweise dem Anatomieatlas von Sobotta-Becher (Knochenlehre des Extremitätenskeletts. Lit.: 19) entnommen.

Zum leichteren Verständnis der im folgenden gezeigten Aufnahmen des Handwurzelskeletts und zur topographischen Orientierung über Anordnung und Beziehungen der Handwurzelelemente zueinander dient die Schemazeichnung in Abbildung 6, welche in einem Ausschnitt die Knochenverhältnisse in der Hand eines Erwachsenen wiedergibt.



(1) distaler Unterarm

R Radius mit distaler Epiphyse (Re)
 U Ulna mit distaler Epiphyse (Ue)

(2) Handwurzel

a	Scaphoid	e	Trapezium
b	Lunatum	f	Trapezoideum
c	Triquetrum	g	Capitatum
d	Pisiforme	h	Hamatum

(3) Mittelhand

I Metacarpale I mit Metacarpalepiphyse (Me)
 II Metacarpale II zum Zeigefinger
 III Metacarpale III zum Mittelfinger
 IV Metacarpale IV zum Ringfinger
 V Metacarpale V zum kleinen Finger

Abbildung 6 : Schema der Knochenanordnung beim Erwachsenen

(1) Distale Enden der Unterarmknochen

Zu sehen sind die distalen Anteile von Speiche (Radius; links) und Elle (Ulna; rechts), wobei die gestrichelte Linie jeweils den Verlauf der Epiphysenfuge angibt. Proximal davon liegt der Schaft, distal davon die Epiphyse.

(2) Handwurzel

Die acht, sehr unregelmäßig gestalteten Handwurzelknochen (Carpalia) sind in zwei Viererreihen angeordnet. Proximal, das heißt, dem Unterarm benachbart, liegen von radial nach ulnar das Kahnbein (Scaphoid), das Mondbein (Lunatum), das Dreiecksbein (Triquetrum) und, auf dessen lateraler Rückenfläche, das Erbsenbein (Pisiforme). Distal dieser Reihe liegen von radial nach ulnar das trapezförmige Bein (Trapezium), das trapezförmliche Bein (Trapezoid), das Kopfbein (Capitatum) und das Hakenbein (Hamatum).

Die vier proximalen Handwurzelknochen bilden keine geradparallele Reihe, sondern einen proximalwärts schwach konvexen, nach distal dagegen stark konkaven Bogen. Die Knochen der distalen Reihe, vor allem Capitatum und Hamatum sind so geformt, daß sie diese Konkavität ausfüllen, so daß die Handwurzel ein komplexes und annähernd lückenloses Knochenmosaik darstellt, welches zusätzlich ein dorsalwärts konvexes, palmarwärts konkaves Gewölbe bildet.

(3) Proximale Enden der Mittelhandknochen

Bei den fünf Mittelhandknochen (Metacarpalia I bis IV) handelt es sich um Röhrenknochen, bei welchen man das proximale Endstück (Basis), das Mittelstück (Corpus)

und das distale Endstück (Caput) unterscheidet. Die Basen sind mit der distalen Reihe der Handwurzelknochen verbunden, die Köpfchen mit der Reihe der proximalen Fingerknochen (Grundphalangen). Der dicke Mittelhandknochen des Daumens ist der kürzeste, der des Zeigefingers der längste, gegen den kleinen Finger nehmen sie kontinuierlich an Länge wieder ab. Die Basen der Handwurzelknochen sind unregelmäßig kubisch geformt und liegen einander dicht benachbart mit Ausnahme des Metacarpale I, das zudem als einziges eine proximale Epiphyse (nachfolgend kurz Metacarpalepiphyse genannt) besitzt.

In der Abbildung 6 ist das Metacarpale I noch vollständig zu sehen, während die Übrigen nur bis zum Übergang vom mittleren zum distalen Drittel abgebildet sind. An die Metacarpalia schließen sich nach distal die Fingerknochen (Phalangen) an, von denen der Daumen zwei (Grund- und Endphalange), die Übrigen vier Finger je drei (Grund-, Mittel- und Endphalange) besitzen.

Von den bisher genannten Knochen im Handwurzelbereich sind im Rahmen der transmissionssonographischen Untersuchungen diejenigen interessant, die knorpelig vorgebildet sind, im Laufe der Skelettreifung allmählich verknöchern und transmissionssonographisch gut darstellbar sind.

Diese Bedingungen werden von den Handwurzelknochen sowie von den handwurzelnahen Epiphysen des distalen Radius, der distalen Ulna und des proximalen Metacarpale I erfüllt. Daher bieten sich für die Beurteilung des Handwurzelstatus in dieser Arbeit folgende elf Knochenelemente an, die an einigen Textstellen mit dem Begriff Handwurzel zusammengefasst sind:

- die acht Handwurzelknochen
- die drei handwurzelnahen Epiphysen.

Die in Klammern angegebenen Zeiträume stellen den Durchschnittswert für den Ossifikationsbeginn dar. In Abbildung 7 sind sie als schwarzer Punkt wiederzufinden. Außerdem zeigt die Graphik durch die keilförmigen Spitzen das Streuungsintervall, innerhalb dessen der Ossifikationsbeginn physiologischerweise variieren kann. Während diese Breite bei Capitatum, Hamatum und Radiusepiphyse verhältnismäßig gering ist (im Bereich von wenigen Monaten), umfaßt sie bei den übrigen Knochenelementen bis zu 4 Jahren. Dies erklärt, warum sich insbesondere bei den Gruppen von Skelettelementen, die zum gleichen Zeitraum (siehe oben) zu verknöchern beginnen, intraindividuelle Änderungen dieser Reihenfolge ergeben können.

Veränderungen während der fortschreitenden Ossifikation

Nach dem Auftreten der einzelnen Ossifikationszentren erfolgt das Größenwachstum und die sich dabei vollziehende Formgestaltung der Knochenzone. Bei ungestörtem Ablauf lassen sich drei Abschnitte abgrenzen (nach Schmid, Lit.: 18):

1. Auftreten eines rundlichen Ossifikationszentrums von homogener Struktur, das die rundliche Form etwa 1 1/2 Jahre lang bis zu einem Durchmesser von fünf Millimeter beibehält.
2. Anschließend daran erfolgt durch das Größenwachstum der Knochenzone deren spezifische Formgestaltung. Die Flächensilhouette erreicht um die Pubertät ihre grob abgeschlossene Form.
3. Nach der Pubertät erfolgt ohne wesentliche Größenzunahme ein Raumwachstum, durch das bestehende Lücken ausgefüllt werden.

und das distale Endstück (Caput) unterscheidet. Die Basen sind mit der distalen Reihe der Handwurzelknochen verbunden, die Köpfchen mit der Reihe der proximalen Fingerknochen (Grundphalangen). Der dicke Mittelhandknochen des Daumens ist der kürzeste, der des Zeigefingers der längste, gegen den kleinen Finger nehmen sie kontinuierlich an Länge wieder ab. Die Basen der Handwurzelknochen sind unregelmäßig kubisch geformt und liegen einander dicht benachbart mit Ausnahme des Metacarpale I, das zudem als einziges eine proximale Epiphyse (nachfolgend kurz Metacarpalepiphyse genannt) besitzt.

In der Abbildung 6 ist das Metacarpale I noch vollständig zu sehen, während die Übrigen nur bis zum Übergang vom mittleren zum distalen Drittel abgebildet sind. An die Metacarpalia schließen sich nach distal die Fingerknochen (Phalangen) an, von denen der Daumen zwei (Grund- und Endphalange), die Übrigen vier Finger je drei (Grund-, Mittel- und Endphalange) besitzen.

Von den bisher genannten Knochen im Handwurzelbereich sind im Rahmen der transmissionssonographischen Untersuchungen diejenigen interessant, die knorpelig vorgebildet sind, im Laufe der Skelettreifung allmählich verknöchern und transmissionssonographisch gut darstellbar sind.

Diese Bedingungen werden von den Handwurzelknochen sowie von den handwurzelnahen Epiphysen des distalen Radius, der distalen Ulna und des proximalen Metacarpale I erfüllt. Daher bieten sich für die Beurteilung des Handwurzelstatus in dieser Arbeit folgende elf Knochenelemente an, die an einigen Textstellen mit dem Begriff Handwurzel zusammengefasst sind:

- die acht Handwurzelknochen
- die drei handwurzelnahen Epiphysen.

2) Verknöcherung der Handwurzel

Beginn der Ossifikation

Untersucht man beim normal reifen Neugeborenen die Skelettelemente der Hand, so stellt man fest, daß nur die Metacarpalia sowie alle Phalangen knöchern vorliegen. Alle übrigen, das Handskelett bildende Elemente sind zu diesem Zeitpunkt zwar ebenfalls vorhanden, befinden sich aber in knorpeligem Zustand.

Im Laufe der Skelettentwicklung bis zum Abschluß nach der Pubertät gehen sie vom knorpeligen in den knöchernen Zustand über. Dieser Vorgang beginnt dabei für die einzelnen Elemente zu unterschiedlichen Zeitpunkten und vollzieht sich in der Weise, daß sich initial eine sogenannte Verknöcherungszone (Ossifikationszentrum) bildet, die sich zentrifugal ausdehnt, bis das gesamte Element schließlich knöchern ausdifferenziert ist.

Aufgrund von Ergebnissen großer Studien (Greulich und Pyle (Lit.: 07), Schmid und Moll (Lit.: 18), Stuart und Mitarbeiter (Lit.: 18)) konnten bezüglich dieser Entwicklungsvorgänge gewisse Regeldaten festgestellt werden. Danach ergibt sich für den Zeitpunkt des ersten Auftretens eines Knochenkernes in den Handwurzelknochen die nachstehende Reihenfolge:

- Capitatum (3. Monat)
- Hamatum (3. bis 4. Monat)
- Radiusepiphyse (12. Monat)
- Triquetrum und Metacarpalepiphyse (3. Lebensjahr)
- Lunatum (4. Lebensjahr)
- Trapezium, Trapezoid und Scaphoid (5. Lebensjahr)
- Ulnaepiphyse (8. Lebensjahr)
- Pisiforme (9. Lebensjahr)

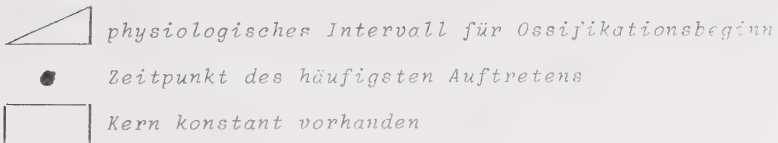
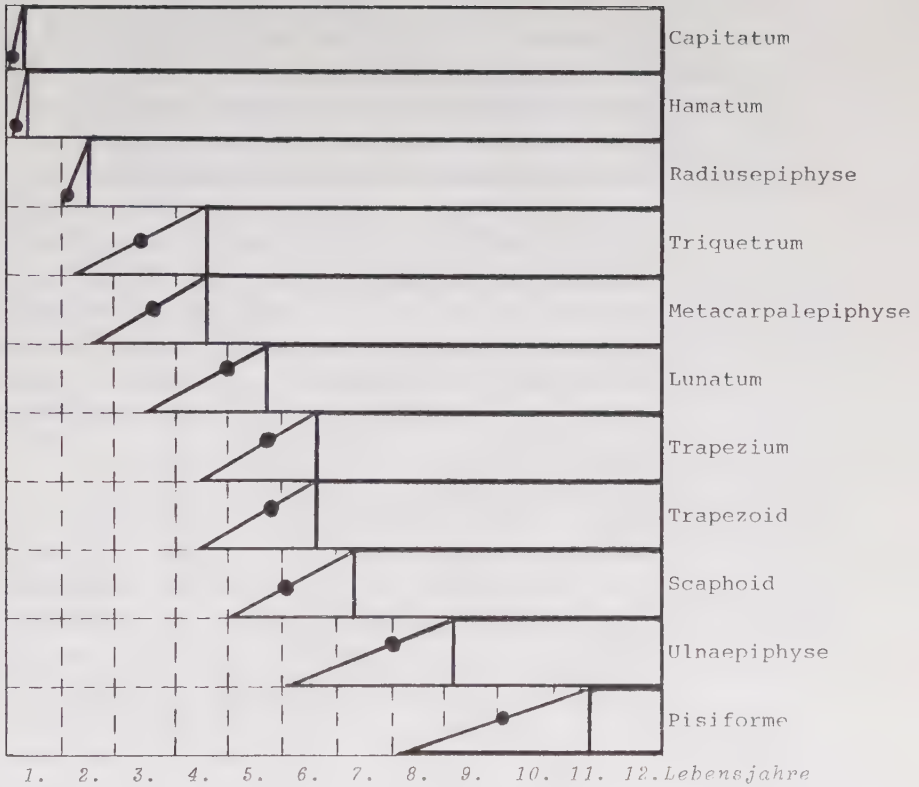


Abbildung 7 : Tabelle zum Ossifikationsbeginn bei den Handwurzelknochen (modifiziert nach F. Rohd und L. Halden, aus Lit.: 21)

Die in Klammern angegebenen Zeiträume stellen den Durchschnittswert für den Ossifikationsbeginn dar. In Abbildung 7 sind sie als schwarzer Punkt wiederzufinden. Außerdem zeigt die Graphik durch die keilförmigen Spitzen das Streuungsintervall, innerhalb dessen der Ossifikationsbeginn physiologischerweise variieren kann. Während diese Breite bei Capitatum, Hamatum und Radiusepiphyse verhältnismäßig gering ist (im Bereich von wenigen Monaten), umfaßt sie bei den übrigen Knochenelementen bis zu 4 Jahren. Dies erklärt, warum sich insbesondere bei den Gruppen von Skelettelementen, die zum gleichen Zeitraum (siehe oben) zu verknöchern beginnen, intraindividuelle Änderungen dieser Reihenfolge ergeben können.

Veränderungen während der fortschreitenden Ossifikation

Nach dem Auftreten der einzelnen Ossifikationszentren erfolgt das Größenwachstum und die sich dabei vollziehende Formgestaltung der Knochenzone. Bei ungestörtem Ablauf lassen sich drei Abschnitte abgrenzen (nach Schmid, Lit.: 18):

1. Auftreten eines rundlichen Ossifikationszentrums von homogener Struktur, das die rundliche Form etwa 1 1/2 Jahre lang bis zu einem Durchmesser von fünf Millimeter beibehält.
2. Anschließend daran erfolgt durch das Größenwachstum der Knochenzone deren spezifische Formgestaltung. Die Flächensilhouette erreicht um die Pubertät ihre grob abgeschlossene Form.
3. Nach der Pubertät erfolgt ohne wesentliche Größenzunahme ein Raumwachstum, durch das bestehende Lücken ausgefüllt werden.

Einen annähernden Einblick über das Fortschreiten dieser Entwicklung gibt die Abbildung 8 wieder. In ihr sind die wichtigsten Normstadien bezüglich Beginn und Formgestaltung der Knochenkerne wiedergegeben. Durch den gleichen Verkleinerungsmaßstab und formgetreue Wiedergabe kommen die Größen- und Proportionsverschiebungen im Laufe des Wachstums zum Ausdruck.

Aus dem bisher Gesagten ergibt sich, daß der interindividuelle Ablauf der Handskelettossifikation sehr verschieden sein kann. Neben pathologischen Ursachen (zum Beispiel Unterernährung, endokrine Störungen, genetische Mißbildungen) akzeptiert man heute eine Reihe von endogenen Faktoren, die die Handskelettentwicklung physiologisch determinieren. Dazu zählen im allgemeinen das Geschlecht, die Körperlänge, Konstitution und Rasse. Intraindividuell ist die Knochenentwicklung am engsten mit der geschlechtlichen Reifung korreliert. Mit dem Erreichen der vollen Geschlechtsreife ist auch die Knochenentwicklung im Groben abgeschlossen. Gerade darauf beruht der - von vielen Autoren ganz verschieden groß angegebene - Ossifikationsvorsprung, den Mädchen vor den Knaben haben, weil sie früher pubertieren. Entsprechendes gilt für rassische Unterschiede. Üblicherweise wird heute als Standardvergleichswerk der Atlas von Greulich und Pyle verwendet, bei dem Körperlänge, Konstitution und Rasse als innerhalb der physiologischen Variationsbreite liegend betrachtet werden. Lediglich nach dem Geschlecht wird unterschieden, so daß sowohl für Mädchen als auch für Knaben je ein gesonderter Standard für die Ossifikation angegeben wird.

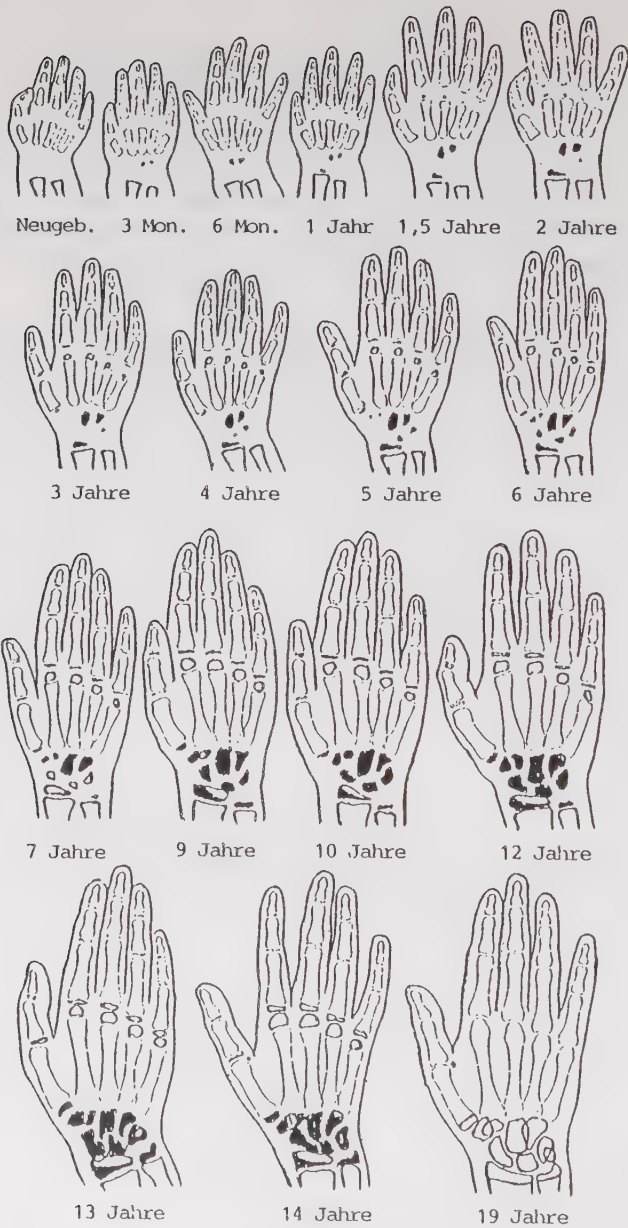


Abbildung 8 : Schema der Handskelettentwicklung
(nach F. Schmid, H. Moll, Lit.: 18)

3) Bestimmung des Skelettalters

Da die Entwicklung des Handskeletts durch Auftreten und spezifisches Größen- und Formwachstum praktisch kontinuierlich in gut abgrenzbare kleine Abschnitte unterteilt werden kann, bietet sich dieser Skelettbereich an, Rückschlüsse auf die Ossifikationsvorgänge des gesamten Körpers zu ziehen. Als Methode der Wahl nimmt das Röntgenbild der Hand seit jeher in der Beurteilung der normalen, sowie der pathologischen Skelettentwicklung eine besondere Stellung ein. Nachdem Sonntag und Caffey die linke Körperhälfte zur radiologischen Beurteilung der Skelettentwicklung vorgeschlagen haben, fertigt man dazu zweckmäßigerweise eine Aufnahme der linken Hand an. Diese wird in erster Linie zur Bestimmung des sogenannten Knochenalters (englisch: bone-age) herangezogen.

Je nach erforderlicher Genauigkeit genügt entweder der Vergleich mit tabellarischen Übersichten (etwa wie in Abbildung 7) oder es müssen Vergleichsbilder herangezogen werden, die die altersentsprechenden Größen- und Formveränderungen aller Knochenelemente der Hand berücksichtigen (wie im Röntgenatlas von Greulich und Pyle, Lit.: 07) oder aber man führt die Ausmessung der einzelnen Knochenelemente mit einem transparenten Millimeterpapier durch und vergleicht die Werte mit den Standardwerten (wie von Schmid und Moll vorgeschlagen).

Bei der Beurteilung des Handradiogramms sollten folgende Aspekte berücksichtigt werden (nach F. Schmid und H. Moll, Lit.: 18):

- Zunächst wird der dem Lebensalter des Kindes entsprechende Standard im Atlas aufgesucht und

festgestellt, ob Aufnahme und Standard sich entsprechen beziehungsweise die Aufnahme in die durch untere und obere Norm begrenzte physiologische Streubreite paßt. Dabei tendieren Knaben zur unteren, Mädchen zur oberen Norm.

- Danach ist die Form und Größe der Handwurzelknochenkerne genauer zu vergleichen, wobei man am zweckmäßigsten in der Reihenfolge ihres physiologischen Auftretens (siehe oben) vorgeht.
- Schließlich betrachtet man die Epiphysen der übrigen Handknochen (Metacarpalia und Phalangen).
- Zum Schluß wird die Handlänge gemessen, in dem man den Abstand von der medialen Ecke der Ulna-Verkalkungszone bis zum äußeren Rand der Weichteilkontur der Mittelfingerkuppe registriert.

Geht man nach der eben beschriebenen Methode vor, so kann man das dieser Aufnahme entsprechende Knochenalter relativ genau angeben. Stimmen Knochenalter und Lebensalter annähernd überein, so kann man von einem normalen Verlauf der Skelettossifikation ausgehen. Treten jedoch mehr oder weniger auffällige Abweichungen auf, so muß man an pathologische Einflüsse (pubertas praecox oder tarda, Erkrankungen des Skelettsystems) denken.

H) DIE UNTERSUCHUNGSERGEBNISSE

Die anschließende Beschreibung und Beurteilung von ausgewählten transmissionssonographischen Aufnahmen gibt einen Einblick in die Art und Aussagekraft der Monitorbilder in Bezug auf die verschiedenen Aspekte des Themas dieser Arbeit.

Eine kurzgefasste Veröffentlichung der wichtigsten Untersuchungsergebnisse erfolgte beim Dreiländertreffen für Ultraschalldiagnostik in Bern (Lit.: 22) im Dezember 1982 sowie auf dem Kongreß für Ultraschall in Brighton (Lit.: 11) im Juli 1983.

1) Transmissionssonographische Handübersichtsaufnahme

Zu Beginn der Studie wurden von einigen Kindern Transmissionsaufnahmen gemacht, bei denen der Abbildungsmaßstab so gewählt wurde, daß auf dem Monitor die komplette Hand einschließlich des distalen Unterarmdrittels zu sehen war.

Dies diente einerseits dazu, einen Gesamteindruck von den transmissionssonographischen Abbildungsergebnissen bei der Hand zu erhalten und andererseits dazu, einen Überblick über die einzelnen Skelettabschnitte und ihr Verhältnis zueinander zu gewinnen. Da die Detailwiedergabe in den Übersichtsaufnahmen jedoch nicht besonders gut war, wurden bald nur noch Zielaufnahmen des Handwurzelskeletts angefertigt.

In Abbildung 9 ist zunächst eine Übersichtsaufnahme der Hand eines Mädchens mit 4 Jahren und 1 Monat wiedergegeben.



Abbildung 9 :
*Übersichtsaufnahme der rechten Hand eines
Mädchens (Alter: 4 Jahre 1 Monat) in dorso-
ventraler Transmissionsrichtung*

Beschreibung und Erklärung:

Das Monitorbild zeigt eine Hand einschließlich der fünf Finger und einem Teil des Unterarms. Der objektfreie Bereich umgibt als helle Fläche die Organstrukturen, die ihrerseits durch verschiedene Helligkeiten zu erkennen sind. Dabei sind die Skelettelemente schwarz, die Weichteile in unterschiedlichen Graustufen (von fast weiß bis fast schwarz) wiedergegeben.

Bei den Skelettelementen läßt sich die im vorigen Kapitel gegebene Gliederung gut erkennen:

Der linke *Unterarmknochen* ist der Radius, dessen Schaft zum distalen Ende hin immer breiter wird und dort endet, wo sich der größte Quermesser in Form zweier seitlich vorspringender Zapfen bestimmen läßt. Das bereits ausgebildete Knochenzentrum der Radius-epiphyse ist als halbrunder, dem Radiuschaft eng anliegender Bezirk zu sehen. Der schmalere Knochen auf der linken Unterarmseite ist die Ulna, deren Schaftende sich oberhalb der anschließenden Aufhellungszone in gleicher Höhe wie das Radiuschaftende befindet. Ein Knochenkern in der Ulnaepiphyse ist nicht zu sehen und beim Alter der Probandin auch nicht zu erwarten (gleiches gilt bei den Handwurzelknochen für das Pisiforme).

Als *Handwurzel* stellen sich mehrere rundliche, zum Teil ineinander übergehende Knochenzentren dar. In der Reihe der proximalen Handwurzelelemente erkennt man seitlich unter der Radius-epiphyse einen separaten Rundherd, welcher der Lage des Scaphoid entspricht. Unter dem Ulnaende liegt eine Zone, die mindestens zwei Zentren mit Knochensubstanz vermuten läßt, was mit Knochenkernen im Lunatum und Triquetrum vereinbar

wäre. In der distalen Reihe lassen sich vier Knochenzonen abgrenzen: der freiliegende, querovale Bereich unter dem Scaphoidkern rührt vom Ossifikationszentrum des Trapeziums her. Der über Metacarpale II in Strahlrichtung längsovale Knochenkern zeigt die Lage des Trapezoidkerns. Die beiden nach ulnar anschließenden Knochenzentren über den Metacarpalia III und IV sind sehr deutlich zu identifizieren und werden durch Capitatum und Hamatum hervorgerufen.

Die *Metacarpalepiphyse* befindet sich als weiterer, angedeutet schüsselförmiger Knochenkern über der Basis von Metacarpale I.

Deutlich stellt sich die *Mittelhand* dar. Das separat gelegene Metacarpale I ist kurz und gedrunken, die übrigen vier Metacarpalia sind länger, schlanker und liegen mit ihren proximalen Enden eng aneinander. Bei allen fünf Mittelhandknochen können Basis, Schaft und Caput unterschieden werden.

Der Aufbau des *Fingerskeletts* aus zwei beziehungsweise je drei Phalangen ist insgesamt gut erkennbar, lediglich die drei Knochen des kleinen Fingers stellen sich nur angedeutet dar, was jedoch keineswegs typisch für die Handaufnahmen ist. Außerdem fällt auf, daß die Endphalangen der vier langen Finger verhältnismäßig verschwommen erscheinen. Der Grund für derartig unscharfe Knochenabbildungen ist im allgemeinen darin zu sehen, daß sich die betreffenden Knochen nicht mehr in der Ebene der schärfsten Abbildung befinden. Dazu ist zu bemerken, daß sich die Ebene durch die Skelettelemente einer kompletten Hand bei flach und ruhig auf die Objektplatte aufgelegter Hand nicht mit der Ebene der schärfsten Abbildung zur Deckung bringen läßt. Ursächlich dafür ist die Abnahme der Handdicke

von der Handwurzel zu den Fingerspitzen hin. Daher gelingt es kaum, über die Gesamtfläche einer Hand eine überall zufriedenstellend scharfe Wiedergabe der Skelettelemente zu erzielen. Anders verhält es sich bei kleineren Skelettausschnitten, bei denen Knochen- und Abbildungsebene ausreichend zusammenfallen (siehe Bilder im folgenden Abschnitt).

Bei den Nicht-Skelettelementen ist eine Differenzierung verschiedener Weichteilstrukturen möglich.

Die Grenze zwischen organischem Gewebe und umgebendem Wasser stellt sich meist scharf dar, wie etwa bei Unterarm und Handteller in Abbildung 9, wo die Organgrenzen durch einen dunklen Randsaum erkennbar sind. Gegen die Fingerspitzen hin verliert sich dieser Randsaum, so daß die Grenze Organ - Wasser nicht eindeutig festzulegen ist. Möglicherweise ist das Vorhandensein des Randsaumes abhängig von der Wechselwirkung des Ultraschalls mit den tangential getroffenen Organgrenzen beziehungsweise von der Größe des Winkels, den die Abbildungsebene mit den jeweiligen Oberflächentangenten bildet. Durch die Abnahme der Handdicke zu den Fingerspitzen ändern sich beide Größen und können damit das Fehlen des Randsaumes bedingen.

Verschiedentlich treten innerhalb der Weichteilbereiche bestimmte Strukturen deutlich hervor. Dies ist etwa der Fall zwischen den Metacarpalia II und III, sowie VI und V, wo jeweils der Verlauf einer Sehne als schräger, dunkelgrauer Streifen erkennbar ist. Je nach Handhaltung (flach - gewölbt) und Einstellung der Abbildungsebene (zum Handrücken oder zur Innenfläche) können an verschiedenen Stellen entsprechend den anatomischen Gegebenheiten derartige Sehnenverläufe erfaßt werden.

Der hellgraue, strukturierte Bereich zwischen den Metacarpalia I und II ist typisch für die dort reichlich vorhandenen Blutgefäße und Muskelstränge und ist auf vielen Aufnahmen des Daumenballens wiederzufinden.

Zu berücksichtigen ist, daß in dieser Arbeit auf eine optimale Darstellung der knöchernen Anteile Wert gelegt wurde; so daß nur eine stark eingeschränkte Beurteilung der transmissionssonographischen Darstellungsqualität für Weichteile gemacht werden darf.

Beurteilung:

Die Monitoraufnahme in Abbildung 9 hat für eine Handübersicht eine durchschnittlich gute Qualität. Die Lage und ungefähre Form und Größe der Knochenelemente sind - im Rahmen der bei der Transmissionssonographie zu erwartenden Abbildungsschärfe - gut zu erkennen und zu differenzieren. Da die Wiedergabe des kompletten Handskeletts gewisse Kompromisse bezüglich einer gleichmäßigen Bildschärfe (siehe oben) erfordert und als "region of interest" der Handwurzelbereich samt der unmittelbaren Umgebung optimal dargestellt werden soll, muß die weniger gute Wiedergabe der Peripherie in Kauf genommen werden.

In der Annahme, daß für Transmissionsbilder ähnliche Beurteilungskriterien gelten wie für Röntgenbilder (siehe dazu Kapitel H) 3): Vergleich von Transmissionsaufnahmen mit Röntgenbildern), stellt die gezeigte Aufnahme einen etwa dem Alter von vier Jahren entsprechenden Befund dar. Im Atlas von Greulich und Pyle findet man im weiblichen Standardteil (Lit.: 07, Seite 148, 149) das Handröntgenbild eines 4 2/12 Jahre alten Mädchens. In dieser Abbildung, die als typisch für dieses Alter beschrieben ist, sind im Handwurzel-

bereich neun Knochenzentren zu sehen, die sich größtmäßig in drei Gruppen aufteilen lassen:

- relativ groß und ausgeprägt sind Capitatum, Hamatum und distale Radiusepiphyse
- mittelgroß sind Triquetrum, Metacarpalepiphyse und Lunatum
- relativ klein, weil am spätesten aufgetreten, sind Trapezium, Trapezoid und Scaphoid.

Beim Vergleich mit den Größenverhältnissen auf der Transmissionsaufnahme fällt insbesondere das Scaphoid als relativ zu groß auf. Bei Lunatum und Triquetrum gelingt es kaum, die zu erwartenden annähernd runden und räumlich getrennt liegenden Ossifikationszentren zu erkennen. Möglicherweise handelt es sich hierbei um einen Artefakt.

Zusammenfassend läßt sich sagen, daß die Handwurzelknochenverhältnisse in Abbildung 9 mit einem entwicklungsphysiologischen Normalbefund vereinbar sind. Die gezeigte Bildqualität der Vergrößerung, die nicht ganz die Güte des Originalmonitorbildes erreicht, ist im allgemeinen immer zu erzielen. Beschreibung und Beurteilung dieser Aufnahme weisen bereits auf die Interpretationsmöglichkeiten hin und vermitteln gleichzeitig einen Eindruck über die Grenzen und Schwächen der Methode.

2) Ausgewählte Aufnahmen von Probanden mit unterschiedlichem Alter.

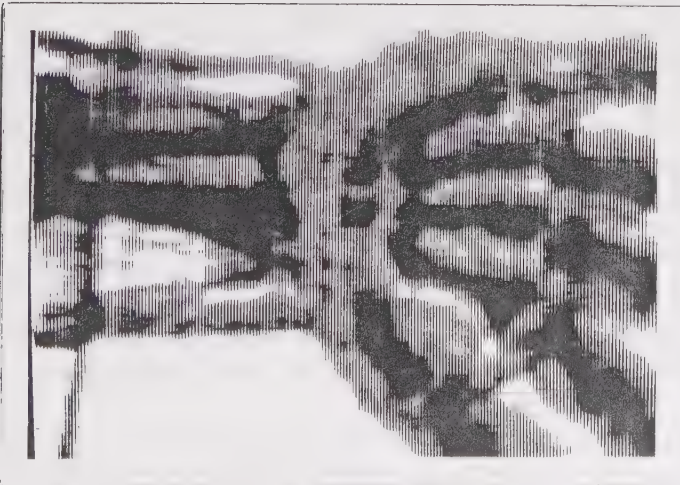
Aus der Gesamtheit aller Aufnahmen der Probanden ohne Röntgenbilder wurden für dieses Kapitel insgesamt acht ausgesucht, die aufgrund ihrer optimalen Schnitt-

einstellung und relativ guten Bildqualität geeignet sind, einen Einblick in die transmissionssonographisch nachweisbare Entwicklung der Ossifikation der Handwurzelknochen zu gewähren. Die acht ausgesuchten Beispiele sollen den Altersbereich von 2 bis 12 Jahren in etwa gleichmäßig abdecken, wodurch sich folgende Bildersequenz ergab (in Klammern die Seitenzahl der Abbildung):

Aufnahme 1 :	Mädchen,	1 Jahr	8 Monate	(S. 51)
Aufnahme 2 :	Junge ,	4 Jahre	0 Monate	(S. 51)
Aufnahme 3 :	Mädchen,	4 Jahre	5 Monate	(S. 56)
Aufnahme 4 :	Junge ,	5 Jahre	5 Monate	(S. 56)
Aufnahme 5 :	Junge ,	6 Jahre	4 Monate	(S. 62)
Aufnahme 6 :	Mädchen,	7 Jahre	4 Monate	(S. 62)
Aufnahme 7 :	Mädchen,	9 Jahre	4 Monate	(S. 68)
Aufnahme 8 :	Junge ,	10 Jahre	3 Monate	(S. 68)

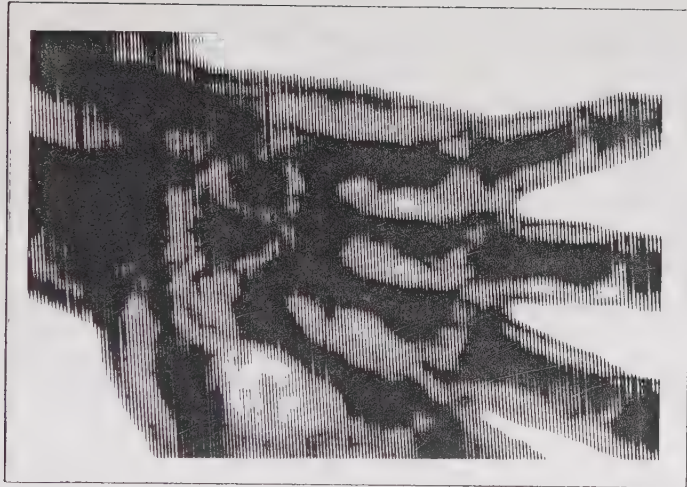
Diese Staffellung stimmt ungefähr mit der Altersverteilung aller Probanden überein (siehe dazu Abbildung 4, Seite 29) und berücksichtigt darüberhinaus Mädchen und Jungen mit 4 : 4 im gleichen Verhältnis. Damit gibt das Kapitel einen repräsentativen Querschnitt aus den Untersuchungsergebnissen dieser Arbeit wieder.

Die folgenden Beschreibungen und Beurteilungen der acht Einzelaufnahmen bauen auf der allgemeinen Besprechung der Handübersichtsaufnahme im vorangegangenen Kapitel auf und sind daher knapper gehalten. Auf etwaige Besonderheiten wird dafür genauer eingegangen, insbesondere wenn der im Transmissionsbild erkennbare Verknöcherungsgrad eine mögliche grobe Abweichung vom Lebensalter vermuten lässt. Als Referenz hierbei dienen wiederum die Röntgenstandardaufnahmen aus dem Atlas von Greulich und Pyle (Lit.: 07).



Aufnahme 1 :

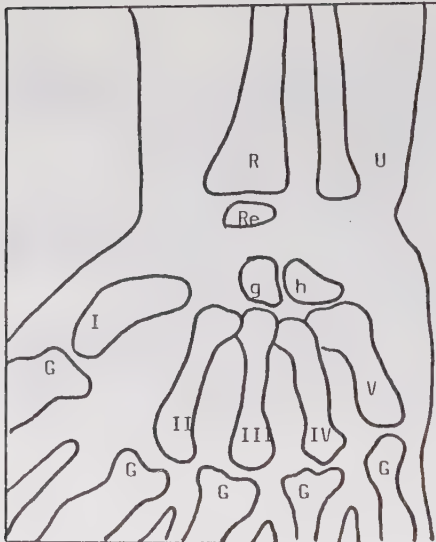
Handmischionbilla der rechten
Hand, Länge, 4 Jahre 6 Monate,



Aufnahme 2 :

Handmischionbilla der rechten
Hand, Länge, 4 Jahre 6 Monate,

Aufnahme 1 (Originalbild: Seite 51 links)



- R Radius
- U Ulna
- Re Radiusepiphyse
- (Ue Ulnaepiphyse)
- (Me Metacarpalepiphyse)
- (a Scaphoid)
- (b Lunatum)
- (c Triquetrum)
- (d Pisiforme)
- (e Trapezium)
- (f Trapezoid)
- g Capitulum
- h Hamatum
- I-V Metacarpalia I - V
- G Grundphalangen
- () noch kein Knochen-
kern ausgebildet

Beschreibung: Zu sehen ist das ventro-dorsale Transmissionsbild der linken Hand eines Mädchens mit 1 Jahr und 8 Monaten. Die Knochenverhältnisse sind klar überschaubar:

Unterarmknochen: Radius links, Ulna rechts. Am oberen Bildrand Artefakte, die zu unscharfen Abbildungsverhältnissen und einem dunklen Querstreifen geführt haben.

Handwurzelnahe Epiphysen: Rundlicher Kern der Radius-epiphyse dem Radiuschaftende in der Mitte angelagert.

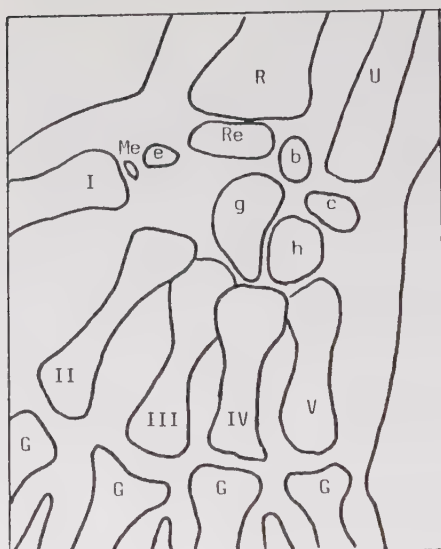
Handwurzelknochen: Capitulum und Hamatum als ovale Knochenkerne über Metacarpale III und IV/V. Darüber hinaus mehrere, über den Handwurzelbereich verstreute dunkle, punktförmige Zonen.

Mittelhandknochen: von links (Daumenseite) nach rechts Metacarpale I bis V. Jeweils gut zu unterscheiden sind die Basis und das Caput vom schmäleren Schaft.

Weichteile: keine besondere Differenzierung.

Beurteilung: Es handelt sich um eine sehr gute Aufnahme mit altersentsprechendem Verknöcherungsbefund. Capitatum, Hamatum und Radiusepiphyse sind der Form und Größe nach gut mit den zu erwartenden Röntgenbefunden vereinbar. Die Artefakte am oberen Bildrand sind vermutlich auf eine unruhige Wasseroberfläche in Objektnähe zurückzuführen. Die zahlreichen punktförmigen, dunklen Zonen im Handwurzelbereich könnten zwar durch kleinste Knochenherde hervorgerufen worden sein. Jedoch ist wegen der großen Anzahl und ihrer weiten Streuung eher zu vermuten, daß es sich hierbei um einen Artefakt handelt, wobei unklar ist, was zu dieser Schallintensitätsminderung führt. Punktförmige Zonen dieser Art sind auf fast allen Aufnahmen zu sehen und machen es im Einzelfall manchmal schwierig zu entscheiden, ob es sich dabei um einen kleinen Knochenkern oder um einen Artefakt handelt. Einen genaueren Aufschluß über diese Fragestellung ist möglich beim direkten Vergleich der Transmissionsaufnahme mit dem zugehörigen Röntgenbild (siehe dazu nächstes Kapitel).

Aufnahme 2 (Originalbild: Seite 51 rechts)



- | | |
|------|--|
| R | Radius |
| U | Ulna |
| Re | Radius epiphysis |
| (Ue) | Ulna epiphysis |
| Me | Metacarpal epiphysis |
| (a) | Scaphoid |
| b | Lunatum |
| c | Triquetrum |
| (d) | Pisiforme |
| e | Trapezium |
| (f) | Trapezoid |
| g | Capitatum |
| h | Hamatum |
| I-V | Metacarpalia I - V |
| G | Grundphalangen |
| () | noch kein Knochen-
kern ausgebildet |

Beschreibung: Zu sehen ist das dorso-ventrale Transmissionsbild der rechten Hand eines Jungen im Alter von 4 Jahren.

Unterarmknochen: Radius links, Ulna rechts, jeweils mit ziemlich unscharfen Randkonturen. Schaftende der Ulna nicht sicher anzugeben.

Handwurzelnahe Epiphysen: Die Radius epiphysis ist auf dieser Aufnahme schwer vom Radius schaftende abzugrenzen. Als neuen Knochenkern erkennt man die Metacarpalepiphysis als dreieckförmige Ausziehung über Metacarpale I.

Handwurzelknochen: deutlich zu erkennen sind Capitatum und Hamatum. Weitere Knochenkerne befinden sich im Triquetrum (schräg rechts über dem Hamatum), im Lunatum (in der Mitte über Capitatum und Hamatum) sowie im Trapezium (zwischen Metacarpalepiphysis und

Radiusepiphyse). Die gesamte Handwurzel ist durch zahlreiche kleine, dunkle Zonen verschattet.

Mittelhandknochen: Metacarpale I (links) nur zur Hälfte und unscharf, Metacarpalia II bis V komplett und deutlich wiedergegeben. Schön zu sehen ist der Gelenkübergang von Metacarpale II bis V zu den jeweiligen Endphalangen.

Weichteile: diverse Sehnenverläufe im Bereich der Metacarpalia und insbesondere der Fingergrundgelenke (vor allem an den Strahlen III und IV).

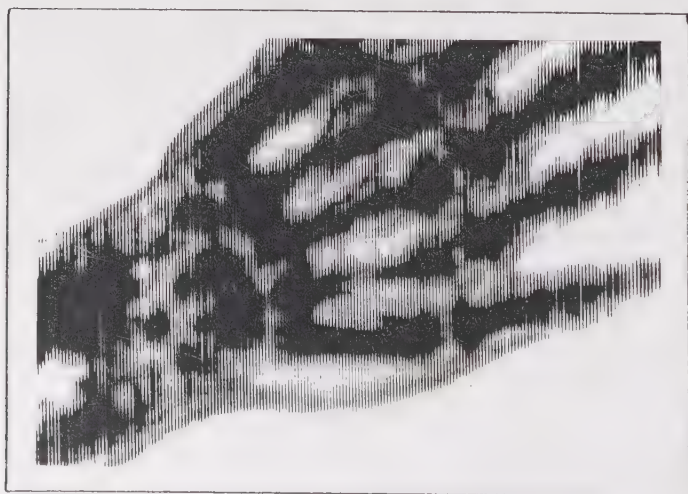
Beurteilung: In dieser durchschnittlich guten Aufnahme lassen Lage, Zahl und Größe der Handwurzelknochen insgesamt einen altersentsprechenden Verknöcherungsbefund erwarten. Beim Vergleich mit der Röntgenstandardaufnahme fällt allerdings auf, daß der Knochenkern des Trapeziums schon mit beträchtlicher Größe zur Ausbildung kommt. Im Alter von 4 Jahren ist dort üblicherweise noch nicht mit einem Ossifikationszentrum zu rechnen.

Die unscharfe Wiedergabe von Ulna und Radius ist vermutlich darauf zurückzuführen, daß sich diese Knochen nicht in der Abbildungsebene befanden.

Die auffallende Verschattung der Weichteilbereiche der Handwurzel steht im Gegensatz zur guten Durchschallbarkeit der übrigen Weichteilzonen.

Möglicherweise besteht hier ein Zusammenhang zwischen Vorhandensein bzw. Fehlen von verknöcherungsfähigem Knorpel.

Außergewöhnlich detailliert ist der Bereich der Fingergrundgelenke zu erkennen. Möglicherweise geben die kugelförmigen Erhebungen an den Basen der Grundphalangen des II., IV., und V. Strahls die dort zu erwartenden Ossifikationszentren der jeweiligen Epiphysen wieder.

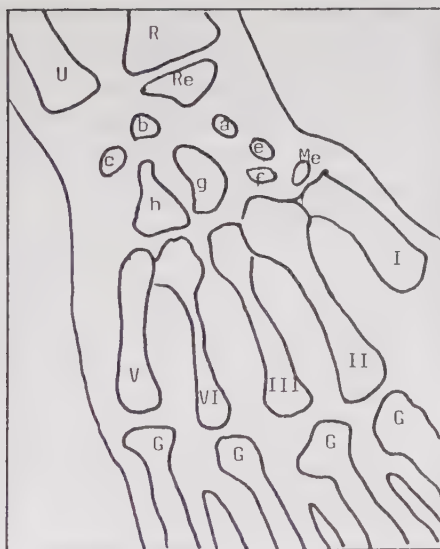


Aufnahme 3 :
Transmissionbild der linken
Hand (Mädchen, 4 Jahre 5 Monate)



Aufnahme 4 :
Transmissionbild der rechten
Hand (Junge, 5 Jahre 5 Monate)

Aufnahme 3 (Originalbild: Seite 56 links)



- | | |
|------|--|
| R | Radius |
| U | Ulna |
| Re | Radiusepiphysse |
| (Ue) | Ulnaepiphysse |
| Me | Metacarpalepiphysse |
| a | Scaphoid |
| b | Lunatum |
| c | Triquetrum |
| (d) | Pisiforme |
| e | Trapezium |
| f | Trapezoid |
| g | Capitulum |
| h | Hamatum |
| I-V | Metacarpalia I - V |
| G | Grundphalangen |
| () | noch kein Knochen-
kern ausgebildet |

Beschreibung: Zu sehen ist das dorso-ventrale Transmissionsbild der linken Hand eines Mädchens im Alter von 4 Jahren und 5 Monaten.

Unterarmknochen: Radius rechts, Ulna links. Ulna insgesamt nur unscharf abgebildet.

Handwurzelnahe Epiphysen: Radiusepiphysse vom Radius scharf abgesetzt und als eindeutige Verlängerung des Radius im Vergleich zur Ulna erkennbar. Gut zu differenzieren ist auch die Metacarpalepiphysse.

Handwurzelknochen: Capitulum und Hamatum separat abzugrenzen. Triquetrum und Lunatum wie in Aufnahme 2 gut zu differenzieren. Über dem II. Strahl befinden sich zwei weitere, knochendichte Bereiche (der größere direkt über dem Metacarpale II, der kleinere weist proximal davon in Richtung Radiusepi-

physe), die die Kerne von Trapezium, Trapezoid und Scaphoid wiedergeben.

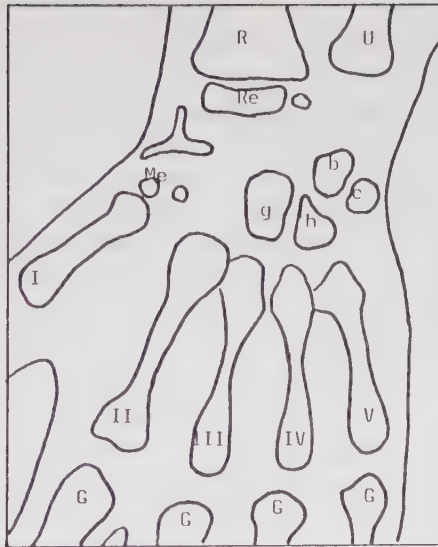
Mittelhandknochen: Metacarpale I (rechts) und V (links) sind normal konfiguriert, die übrigen drei erscheinen in ihrem Schaftbereich unverhältnismäßig dünn und unscharf.

Weichteile: Sehnenverläufe zwischen Metacarpalia I und II, sowie II und III. Strukturen des Bandapparats der Fingergrundgelenke II, IV und V erkennbar.

Beurteilung:

Die Verknöcherungssituation der Handwurzel ist für ein Mädchen mit 4 1/2 Jahren altersentsprechend. Capitatum und Hamatum sind noch einzeln zu erkennen, jedoch beginnen sie transmissionssonographisch bereits miteinander zu verschmelzen. Ähnliches gilt für Radiusepiphyse und Radiuschaftende. Normgerecht ausgeprägt sind Triquetrum, Metacarpalepiphyse und Lunatum. Hinter den Knochenbezirken, die sich nach radial an das Capitatum anschließen, verbergen sich die Kerne von weiteren drei Handwurzelknochen: die Lage und die Ausdehnung sprechen dafür, daß sich der größere, strahlennahgelegene Bezirk aus den Kernen für Trapezium und Trapezoid zusammensetzt, während der darüberliegende kleinere Bezirk dem Scaphoid zuzuordnen ist. Die unterschiedliche Schaftdicke der Metacarpalia ist auf eine leichte Hohlhandstellung zurückzuführen. Während Metacarpale I und V in ihrer größten Dicke abgebildet sind, stellen sich von den übrigen drei nur die schmälere, handinnenflächennahen Bereiche dar. Die Aufnahme 3 ist mit hoher Schallintensität angefertigt worden. Daher werden die Randkonturen der Knochen zum Teil überstrahlt und unscharf abgebildet (vor allem bei Metacarpalia II, III und IV). Andererseits kommen dadurch die Knochen des Handwurzelbereichs besser zur Darstellung.

Aufnahme 4 (Originalbild: Seite 56 rechts)



- R Radius
U Ulna

Re Radius epiphyse
(Ue Ulna epiphyse)
Me Metacarpalepiphysen

(a) Scaphoid
(b) Lunatum
(c) Triquetrum
(d) Pisiforme
(e) Trapezium
(f) Trapezoid
(g) Capitulum
(h) Hamatum

I-V Metacarpalia I - V
Grundphalangen

() noch kein Knochen-
kern ausgebildet

Beschreibung: Zu sehen ist das ventro-dorsale Transmissionsbild der rechten Hand eines Jungen im Alter von 5 Jahren und 5 Monaten.

Unterarmknochen: Radius links, Ulna mit deutlich sichtbarem Schaftende rechts.

Handwurzelnahe Epiphysen: Radius epiphysen als halb-kreisförmiger, distaler Abschluß des Radius. Die Metacarpalepiphysen ist deutlich als runder, auf der Basis von Metacarpale I befindlicher Knochenkern zu sehen.

Handwurzelknochen: Capitulum und Hamatum am typischen Ort. Schräg rechts über dem Hamatum, wo an sich Triquetrum und Lunatum als getrennte Kerne zu erwarten sind, befindet sich ein knochendichter Be-

zirk, der ungefähr die Größe des Capitatum erreicht. Bei genauer Betrachtung erkennt man eine leichte, kommaförmige Aufhellung von der Mitte oben zum Zentrum hin, sowie vom Zentrum zum ulnaren Handrand. Der dadurch abgegrenzte obere rechte Quadrant erscheint nicht schwarz sondern dunkelgrau. In der restlichen Figur lassen sich zwei einander berührende, runde Knochenzentren erkennen.

Im Bereich zwischen Metacarpalepiphyse und Radius-epiphyse befinden sich zwei dunkle Zonen: eine Figur, die von der Radius-epiphyse zum radialen Handrand zieht und einem liegenden Y ähnelt, sowie ein direkt rechts neben der Metacarpalepiphyse liegendes Knochenzentrum.

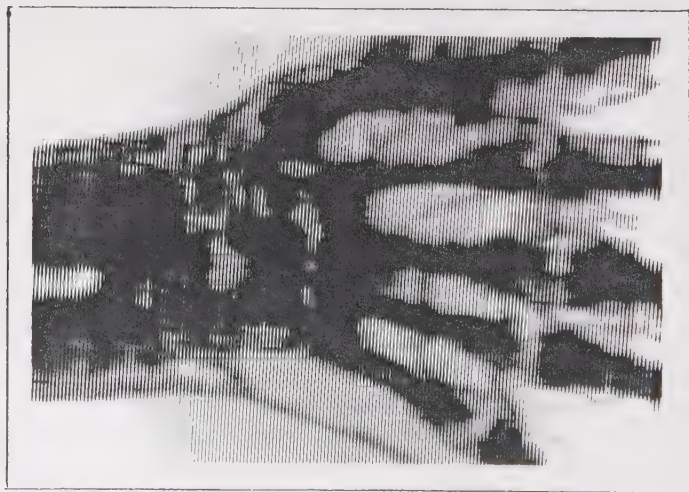
Mittelhandknochen: Metacarpale I (links), II und V normal konfiguriert. Metacarpalia III und IV bei leichter Hohlhandstellung im Schaftbereich nur schmal angeschnitten. Bemerkenswert sind die Fingergrundgelenke II bis V mit den großen Abständen jeweils vom Metacarpale zur Grundphalange.

Weichteile: gut zu erkennen sind Teile des Kapsel-Bandapparats der Fingergrundgelenke II und III.

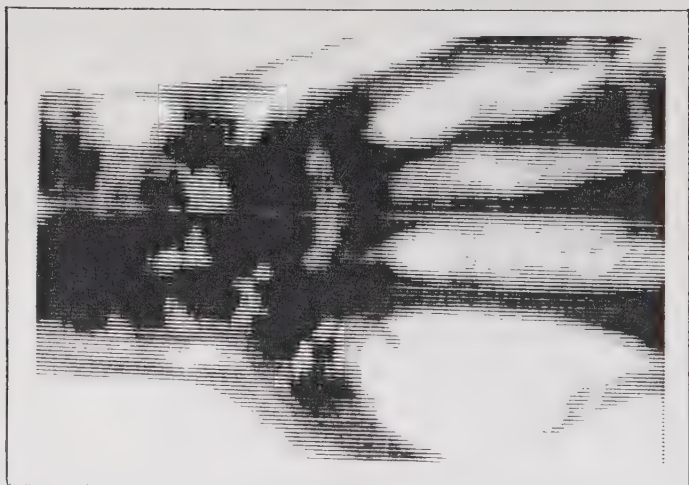
Beurteilung: Insgesamt handelt es sich um eine eher mäßig scharfe Handwurzelaufnahme, die jedoch gerade wegen der nicht eindeutig zu interpretierenden Verhältnisse in den Handwurzelknochen ausgewählt wurde, um auf die möglichen Schwierigkeiten bei der Befundung von transmissionssonographischen Aufnahmen hinzuweisen.

Capitatum, Hamatum, Radius-epiphyse und Metacarpalepiphyse sind leicht zu bestimmen, was bei den übrigen Knochenkernen des Handwurzelbereichs nicht zutrifft. Beim Alter des Probanden ist mit Knochenkernen im Triquetrum und Lunatum zu rechnen, was mit der Lage der schwarzen ulnaren Zonen in der Aufnahme eini-

germaßen vereinbar wäre. Unklar bleibt dann die Herkunft der dunklen Stelle im rechten oberen Quadranten und die Frage, warum sich Triquetrum- und Lunatumkern so groß abbilden (eventuell reiferes Skelettalter). Auch auf der radialen Handwurzelseite besteht das Problem der Deutung der dunklen Bildanteile. Altersbezogen wäre nur ein Kern im Trapezium zu erwarten, was mit dem direkt rechts neben der Metacarpalepiphyse liegenden Knochenzentrum vereinbar wäre. Beim verbleibenden y-förmigen Bereich neben der Radiusepiphyse muß es sich dann um einen Artefakt handeln. Wie aus den bisherigen Erläuterungen hervorgeht, besteht die Schwierigkeit in der Interpretation der Aufnahmen oftmals darin, daß auf dem Monitorbild manche Bereiche als mögliche Knochenkernzonen imponieren, was unter Umständen mit den tatsächlichen Verhältnissen nicht übereinstimmt. Das wiederum kann zu fehlerhaften Interpretationen führen und zu einer falschen Einschätzung des tatsächlichen Skelettalters des Probanden.

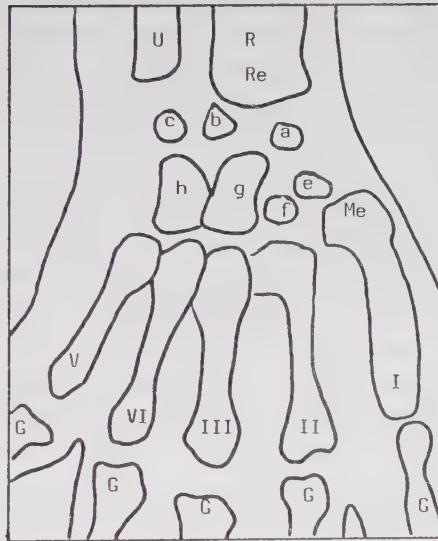


Aufnahme 5 :
 Transmissionsbild der rechten
 Hand (Junge, 4 Jahre 4 Monate)



Aufnahme 6 :
 Transmissionsbild der linken
 Hand (Mädchen, 7 Jahre 4 Monate)

Aufnahme 5 (Originalbild: Seite 62 links)



- | | |
|------|--|
| R | Radius |
| U | Ulna |
| Re | Radius epiphyse |
| (Ue) | Ulna epiphyse |
| Me | Metacarpalepiphysse |
| a | Scaphoid |
| b | Lunatum |
| c | Triquetrum |
| (d) | Pisiforme |
| e | Trapezium |
| f | Trapezoid |
| g | Capitulum |
| h | Hamatum |
| I-V | Metacarpalia I - V |
| G | Grundphalangen |
| () | noch kein Knochen-
kern ausgebildet |

Beschreibung: Zu sehen ist das ventro-dorsale Transmissionsbild der rechten Hand eines Jungen im Alter von 6 Jahren und 4 Monaten.

Unterarmknochen: Radius rechts, Ulna links.

Handwurzelnahe Epiphysen: Radius- und Metacarpalepiphysse sind vom zugehörigen Knochen nicht abzugrenzen.

Handwurzelknochen: Capitulum und Hamatum an typischer Stelle, mit altersentsprechender Größenzunahme. Im Bereich der Kontaktflächen zwischen beiden Knochen besteht transmissionssonographisch keine Abgrenzung mehr. Auf der radialen Handwurzelseite sind drei mittelgroße Knochenkerne zu erkennen: über Metacarpale I vom Trapezium, über Metacarpale II vom Trapezoid und in der Mitte über beiden vom Scaphoid.

Auch das Lunatum ist zwischen Capitatum und ulnarem Radiusrand gut abzugrenzen: Aufgrund der flächigen Verschattung zwischen Hamatum und Ulnaende lässt sich die Lage des Triquetrumkerns nur ungefähr erfassen. Ungeklärt muß aus dem gleichen Grund die Frage bleiben, ob die Ulnaepiphyse bereits einen Knochenkern aufweist. Im übrigen fallen wieder multiple kleine, dunkle Zonen auf, die nicht auf Knochenkerne zurückgeführt werden können.

Mittelhandknochen: alle Metacarpalia sind im mittleren dicken Bereich getroffen und bilden sich scharf ab. Bemerkenswert ist die Größenzunahme der Basen aller Metacarpalia, was zu einem transmissionssonographischen Verschmelzen an den jeweiligen Kontaktflächen führt. Nur Metacarpale I ist noch separat abzugrenzen. Von den Fingergrundgelenken haben die ulnaren drei eine optimale Abbildung erfahren.

Weichteile: einige Sehnenverläufe zwischen Metacarpale I und II, sowie II und III. Kapsel- und Bandapparat der Fingergrundgelenke III bis V teilweise gut zu erkennen.

Beurteilung:

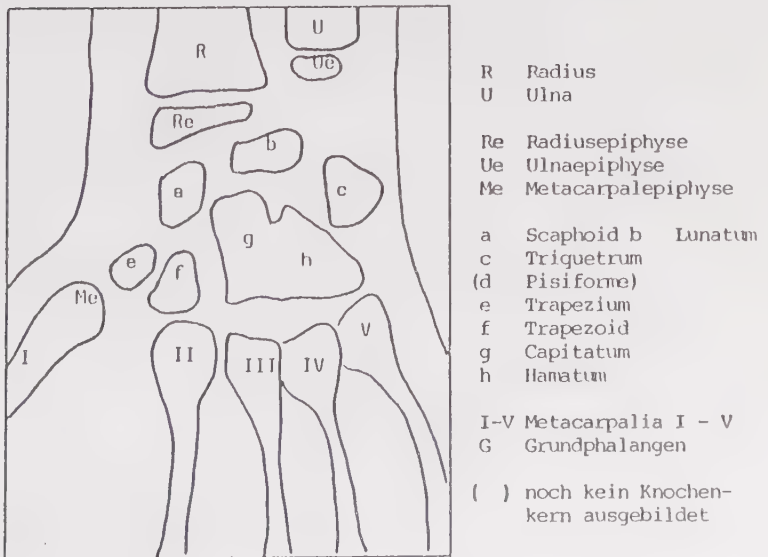
Mit Ausnahme des ulnaren Handwurzelbereichs zeigt die Aufnahme 5 die Knochenverhältnisse recht übersichtlich und deutlich. Die Größe und Anzahl der Knochenkerne lassen sich mit einem Skelettalter von 6 1/2 Jahren vereinbaren.

Im Vergleich zu Aufnahme 4 fällt vor allem auf, daß die Knochenkerne von Trapezium, Trapezoid und Scaphoid bereits als relativ große Zentren eindeutig zu erkennen sind. Für eine Beurteilung der Ossifikationssituation von Ulnaepiphyse und Triquetrum (beides im distalen

Ulnabereich) müßte man eine weitere, entsprechend geeignete Aufnahme anfertigen.

Die scharfe Abbildung der Metacarpalbasen kann als Zeichen gedeutet werden, daß die Abbildungsebene sehr genau im Niveau der Mittelhandknochen und damit auch der Handwurzelknochen liegt. Die dazu vergleichsweise schlechtere Darstellung der Unterarmknochen und völlige Fehlen einer Abgrenzbarkeit der Radiusepiphyse vom Radiuschaft weisen darauf hin, daß sich die distale Unterarmregion bereits nicht mehr optimal in der Schärfenebene befindet.

Aufnahme 6 (Originalbild: Seite 62 rechts)



Beschreibung: Zu sehen ist das ventro-dorsale Transmissionsbild der linken Hand eines Mädchens im Alter von 7 Jahren und 4 Monaten.

Unterarmknochen: der Radius (links) ist mit seiner Verbreiterung zum Schaftende hin gut zu erkennen. Dabei zeigen die beidseitigen, dreieckförmigen hellen Einziehungen sehr genau die Höhe der Epiphysenfuge an und ermöglichen die Abgrenzung der Epiphyse vom Schaftende. Ähnlich verhält es sich bei der Ulna, deren Schaftende jedoch nur für einige Millimeter zu sehen ist.

Handwurzelnahe Epiphysen: Außergewöhnlich schön ist die Radiusepiphyse in ihrer Keilform vom Radius-schaft abgesetzt zu erkennen. Im Gegensatz dazu ist die Metacarpalepiphyse nicht als separater Kern abgegrenzt. Als neues Ossifikationszentrum ist zum ersten Mal der Kern der Ulnaepiphyse zu erkennen. Er zeichnet sich als annähernd runde, dunkle Zone unterhalb des Ulnaschaftendes ab.

Handwurzelknochen: Capitatum und Hamatum sind als ein gemeinsamer Knochenbezirk abgebildet. Die diesen Bereich vertikal durchquerende, gerade, helle Linie setzt sich nach oben und unten über die ganze Bildhöhe fort und ist als Artefakt und nicht als Knochenfuge anzusehen. Alle übrigen Handwurzelknochen stellen sich separat und eindeutig abgrenzbar dar. Nur über das Pisiforme kann keine Aussage gemacht werden. Die vertikale helle Linie durch das Lunatum entstammt ebenfalls dem oben genannten Artefakt.

Mittelhandknochen: Metacarpale I (links) nur zur Hälfte abgebildet. Die Basen der Metacarpalia II bis V liegen sehr dicht beieinander, lediglich zwischen II und III ist noch eine Trennfuge zu erkennen. Schaft und Caput von Metacarpale V sind unscharf abgebildet.

Weichteile: außer einer Sehne, die den Daumenballenbereich quer durchläuft, keine besonderen Strukturen zu erkennen.

Beurteilung:

An der Aufnahme 6 fallen zunächst zwei Dinge auf: die flauere Bildqualität und die Länge der Metacarpalia. Beides ist auf eine vergleichsweise starke Vergrößerung der Monitorbildfotographie zurückzuführen. Die Abmessungen der Metacarpalia geben Aufschluß über den ungefähren Vergrößerungsmaßstab und weisen darauf hin, daß im Vergleich zu den anderen Aufnahmen auch alle übrigen Knochenkerne als relativ zu groß zu erkennen sind.

Bei den Handwurzelknochen im engeren Sinn ergibt sich eine erfreulich klare Darstellung ohne störende Artefakte. So wird bei dieser Aufnahme zum ersten Male die Gliederung in die zwei Knochenreihen (siehe Kapitel H 1) deutlich. In der proximalen Reihe liegen (von links nach rechts) die Kerne von Scaphoid, Lunatum und Triquetrum. Der Kern des Pisiforme ist vermutlich noch nicht verknöchert. Distal erkennt man (ebenfalls von links nach rechts) die Kerne von Trapezium, Trapezoid, Capitatum und Hamatum.

Insgesamt stellt diese Aufnahme ein exzellentes transmissionssonographisches Ergebnis dar und bringt alle relevanten Knochenkerne (Handwurzelknochen und handwurzelnahe Epiphysen) äußerst deutlich zur Darstellung.

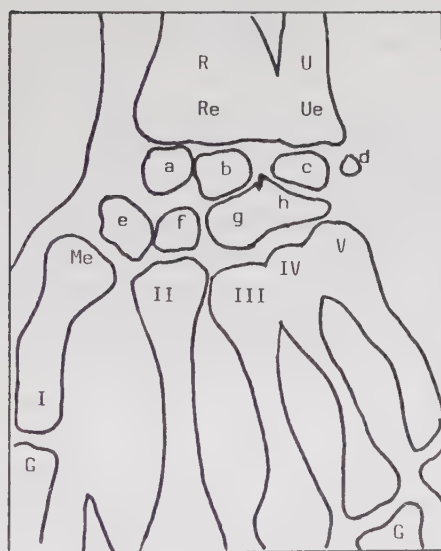


Aufnahme 7 :
Transmissionbild der linken
Hand (Mädchen, 9 Jahre 4 Monate)



Aufnahme 8 :
Transmissionbild der linken
Hand (Junge, 10 Jahre 3 Monate)

Aufnahme 7 (Originalbild: Seite 69 links)



R Radius
U Ulna

Re Radiusepiphyse
Ue Ulnaepiphyse
Me Metacarpalepiphyse

a Scaphoid
b Lunatum
c Triquetrum
d Pisiforme
e Trapezium
f Trapezoid
g Capitulum
h Hamatum

I-V Metacarpalia I - V
G Grundphalangen

Beschreibung: Zu sehen ist das ventro-dorsale Transmissionsbild der linken Hand eines Mädchens im Alter von 9 Jahren und 4 Monaten.

Unterarmknochen: Radius links, Ulna rechts. Transmissionssonographische Verschmelzung an den Kontaktflächen der Schaftenden.

Handwurzelnahe Epiphysen: Die Epiphysen von Radius, Ulna und Metacarpale I sind nicht einzeln abzugrenzen.

Handwurzelknochen: der Handwurzelbereich stellt sich überwiegend schwarz mit nur vereinzelt lichten Stellen dar. Dennoch gelingt es, die beiden Reihen der Handwurzelknochen im engeren Sinn zu erkennen. Die proximale Reihe erstreckt sich über Taphoid und Lunatum (beide unterhalb

des Radius und mit diesem teilweise verschmelzend) sowie Triquetrum (in der Mitte unter Radius und Ulna). Es ist anzunehmen, daß es sich bei der knochendichten Zone ulnarseitig des Triquetrums um den hier erstmalig abgebildeten Kern des Pisiforme handelt. In der distalen Reihe lassen sich alle vier Kerne von radial nach ulnar erkennen: Trapezium und Trapezoid, sowie Capitatum und Hamatum, die jeweils teilweise miteinander verschmelzen.

Mittelhandknochen: Metacarpale I (links) ohne Kontakt zu den übrigen vier Metacarpalia, die an ihren Basen miteinander verschmolzen sind.
Weichteile: Keine bestimmten Strukturen erkennbar.

Beurteilung:

Von der Bildqualität her handelt es sich um eine recht gute Aufnahme des Handwurzelsitus. Die fortgeschrittene Verknöcherungssituation bereitet allerdings gewisse Schwierigkeiten bei der Abgrenzung der einzelnen Knochen. Jedoch ist es möglich, durch jeweils geeignete, variiierende Einstellung der Hand im Ultraschallfeld die einzelnen Freiräume zwischen den Handwurzelknochen abzubilden. In einer einzigen Aufnahme ist dies aber nicht zu erreichen. Auch ist es in diesem Alter nicht mehr möglich, die Epiphysen von Radius, Ulna und Metacarpale I von den jeweiligen Knochenschäften getrennt darzustellen.

Insgesamt scheint das Skelettalter dieser Probandin im oberen Normbereich zu liegen, das heißt, daß in Handaufnahmen gleichaltriger Kinder ein etwas besser differenzierbarer Handwurzelsitus zu erwarten ist.

Weichteile: außer einer Sehne, die den Daumenballenbereich quer durchläuft, keine besonderen Strukturen zu erkennen.

Beurteilung:

An der Aufnahme 6 fallen zunächst zwei Dinge auf: die flauere Bildqualität und die Länge der Metacarpalia. Beides ist auf eine vergleichsweise starke Vergrößerung der Monitorbildfotographie zurückzuführen. Die Abmessungen der Metacarpalia geben Aufschluß über den ungefähren Vergrößerungsmaßstab und weisen darauf hin, daß im Vergleich zu den anderen Aufnahmen auch alle übrigen Knochenkerne als relativ zu groß zu erkennen sind.

Bei den Handwurzelknochen im engeren Sinn ergibt sich eine erfreulich klare Darstellung ohne störende Artefakte. So wird bei dieser Aufnahme zum ersten Male die Gliederung in die zwei Knochenreihen (siehe Kapitel II 1) deutlich. In der proximalen Reihe liegen (von links nach rechts) die Kerne von Scaphoid, Lunatum und Triquetrum. Der Kern des Pisiforme ist vermutlich noch nicht verknöchert. Distal erkennt man (ebenfalls von links nach rechts) die Kerne von Trapezium, Trapezoid, Capitatum und Hamatum.

Insgesamt stellt diese Aufnahme ein exzellentes transmissionssonographisches Ergebnis dar und bringt alle relevanten Knochenkerne (Handwurzelknochen und handwurzelnahe Epiphysen) äußerst deutlich zur Darstellung.

des Radius und mit diesem teilweise verschmelzend) sowie Triquetrum (in der Mitte unter Radius und Ulna). Es ist anzunehmen, daß es sich bei der knochendichten Zone ulnarseitig des Triquetrums um den hier erstmalig abgebildeten Kern des Pisiforme handelt. In der distalen Reihe lassen sich alle vier Kerne von radial nach ulnar erkennen: Trapezium und Trapezoid, sowie Capitatum und Hamatum, die jeweils teilweise miteinander verschmelzen.

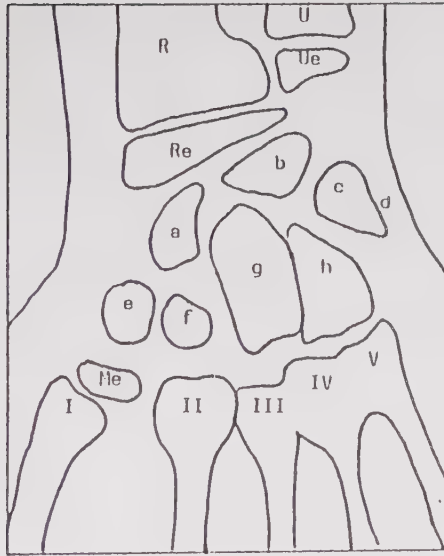
Mittelhandknochen: Metacarpale I (links) ohne Kontakt zu den übrigen vier Metacarpalia, die an ihren Basen miteinander verschmolzen sind.
Weichteile: Keine bestimmten Strukturen erkennbar.

Beurteilung:

Von der Bildqualität her handelt es sich um eine recht gute Aufnahme des Handwurzelsitus. Die fortgeschrittene Verknöcherungssituation bereitet allerdings gewisse Schwierigkeiten bei der Abgrenzung der einzelnen Knochen. Jedoch ist es möglich, durch jeweils geeignete, variierende Einstellung der Hand im Ultraschallfeld die einzelnen Freiräume zwischen den Handwurzelknochen abzubilden. In einer einzigen Aufnahme ist dies aber nicht zu erreichen. Auch ist es in diesem Alter nicht mehr möglich, die Epiphysen von Radius, Ulna und Metacarpale I von den jeweiligen Knochenschäften getrennt darzustellen.

Insgesamt scheint das Skelettalter dieser Probandin im oberen Normbereich zu liegen, das heißt, daß in Handaufnahmen gleichaltriger Kinder ein etwas besser differenzierbarer Handwurzelsitus zu erwarten ist.

Aufnahme 8 (Originalbild: Seite 68 rechts)



- | | |
|-----|---------------------|
| R | Radius |
| U | Ulna |
| Re | Radius epiphysis |
| Ue | Ulna epiphysis |
| Me | Metacarpalepiphysis |
| a | Scaphoid |
| b | Lunatum |
| c | Triquetrum |
| d | Pisiforme |
| e | Trapezium |
| f | Trapezoid |
| g | Capitulum |
| h | Hamatum |
| I-V | Metacarpalia I - V |
| G | Grundphalangen |

Beschreibung: Zu sehen ist das ventro-dorsale transmissionsbild der linken Hand eines Jungen im Alter von 10 Jahren und 3 Monaten.

Unterarmknochen: Radius links, Ulna rechts mit dem Schaftende am oberen Bildrand.

Handwurzelnahe Epiphysen: die laterale Keilfläche der Radius epiphysis ist - wenn auch nur angedeutet - durch die etwas hellere Zone zu erkennen, die sich vom Scaphoid bis zur lateralen Kante des Radius erstreckt. Die Spitze des Keils zeigt sich in der abgerundeten Vorwölbung direkt links über der Mitte des Lunatum. Die Metacarpalepiphysis stellt sich als runde Zone unterhalb des Trapezium dar und liegt mit ihrem ulnaren Flächenanteil in direkter Nachbarschaft zum Metacarpale II. Eindeu-

tig erkennbar ist die Ulnaepiphyse, die sich direkt unter dem klar abzugrenzenden Schaftende der Ulna als querovaler Knochenkern abbildet.

Handwurzelknochen: Zum ersten Mal weist hier das Capitatum seine typische Glockenform auf, auch wenn es vom Hamatum nicht abgesetzt ist. Allerdings erkennt man in Verlängerung des IV. Strahls noch proximal neben dem Capitatum eine knopfförmig vorspringende Zone, die von einem deutlichen, hellen Saum umgeben ist. Dieser Knopf dürfte bereits vom Hamatum stammen, welches in seinem unteren, lateralen Bereich nicht von der Basis des Metacarpale V zu trennen ist. Die übrigen Carpalia sind schön und eindeutig abgebildet. Als zwei benachbarte Knochenkerne stellen sich Trapezium und Trapezoid über Metacarpale I und II dar. In der Mitte über beiden erkennt man die eingekerbte Figur des Scaphoidkerns. Zur Kleinfingerseite hin schließen sich das Lunatum, welches mit der Radius-epiphyse teilweise verschmilzt, und das Triquetrum an. Möglicherweise kommt auch in dieser Aufnahme das Pisiforme als seitliche Ausziehung der Triquetrumkontur zur Darstellung.

Mittelhandknochen: Metacarpale I (links) liegt immer noch separat, allerdings zeigt die Epiphyse die Tendenz, Kontakt zur Basis des Metacarpale II aufzunehmen. Die übrigen vier Metacarpalia stellen sich in Form und Beziehung zueinander typisch dar.

Weichteile: der Bereich des Daumenballens zeigt eine auffallende Strukturierung mit weißen Feldern, die vermutlich auf Muskulatur und Gefäße zurückzuführen sind. Das gleiche gilt für die Zwischenräume der Metacarpalia II und III, sowie IV und V. Als dunkler Schrägstreifen durchquert eine Sehne den Daumenballenbereich von der Basis des Metacarpale II zum Caput des Metacarpale I.

Beurteilung: Im Vergleich zu Aufnahme 7 überrascht hier die deutliche Abbildung der Handwurzel mit den gut abzugrenzenden Handwurzelknochen. In diesem Zusammenhang müssen jedoch drei Punkte berücksichtigt werden: Erstens stammt die Aufnahme 7 von einem Mädchen und es ist bekannt, daß die Skelettreifung bei Mädchen schneller von statten geht als bei Jungen. Zweitens ist denkbar, daß der Befund in Aufnahme 7 an der oberen Normgrenze liegt, wohingegen er in Aufnahme 8 an der unteren Normgrenze liegen könnte. Drittens ist nicht sicher auszuschließen, daß einer der beiden Probanden einen nicht altersentsprechenden Skelettalterbefund aufweist.

3) Vergleich von Transmissionsaufnahmen mit Röntgenbildern.

Dieses Kapitel beschäftigt sich mit der Frage, in wie weit die Darstellung der knöchernen Strukturen im Transmissionsbild mit den Knochenverhältnissen im Röntgenbild übereinstimmt, beziehungsweise ob sich Aussagen über allgemeingültige Unterschiede machen lassen.

Zu diesem Zweck wurden die Bilder von fünf Probanden ausgewählt, von denen sowohl ein gutes Transmissionsbild (a), als auch ein Röntgenbild (b) der Handwurzel vorlag. Es ergab sich, daß die Einzelbefunde wiederum in einer Sequenz angeordnet werden konnten, die den Altersbereich zwischen 2 und 12 Jahren etwa gleichmäßig abdeckt. Folgende Aufnahmen werden erläutert:

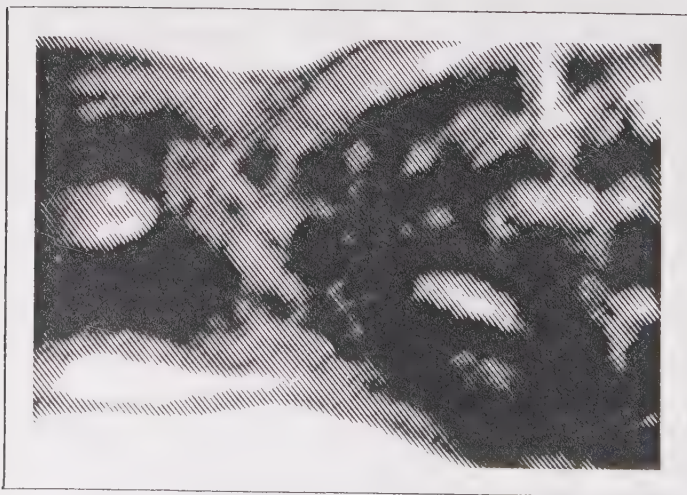
Aufnahmen 9 a und 9 b :	Junge ,	2 Jahre 6 Monate
Aufnahmen 10 a und 10 b :	Mädchen,	3 Jahre 2 Monate
Aufnahmen 11 a und 11 b :	Junge ,	4 Jahre 8 Monate
Aufnahmen 12 a und 12 b :	Mädchen,	6 Jahre 7 Monate
Aufnahmen 13 a und 13 b :	Junge ,	8 Jahre 2 Monate

Da das Röntgenbild als zuverlässige Referenz für die tatsächlichen Knochenverhältnisse herangezogen werden kann, wird auf eine spezielle Beschreibung und Beurteilung der Transmissionsbilder verzichtet. Statt dessen wird in der Besprechung jedes Bildpaares darauf eingegangen, welche Übereinstimmungen und welche Abweichungen zwischen den Abbildungen beider Methoden bestehen.

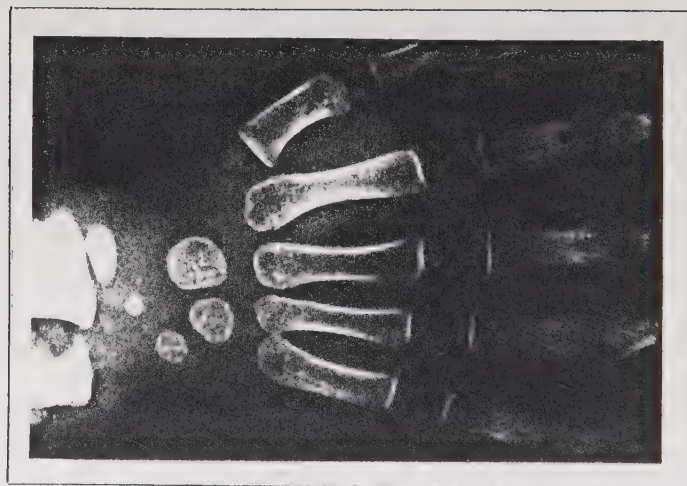
Zum Vorgehen sei erwähnt, daß die Transmissionsaufnahmen unabhängig von den Röntgenbildern angefertigt wurden, das heißt, daß zum Zeitpunkt der Ultraschalluntersuchung das Röntgenbild noch nicht bekannt war. Dadurch konnte sichergestellt werden, daß alle Trans-

missionsaufnahmen von Seiten des Untersuchers unter den gleichen Bedingungen entstanden sind und dieser nicht etwa Gefahr lief, die Vergleichstransmissionsaufnahmen den Röntgenbildern möglichst ähnlich zu machen.

Die Wiedergabe der ausgewählten Bilder erfolgte nach dem Gesichtspunkt, dem Betrachter eine möglichst einfache Vergleichssituation zu bieten. Daher wurden alle Aufnahmen im gleichen Format abgebildet. Der jeweilige Bildausschnitt wurde so gewählt, daß möglichst wenig störende oder überflüssige Bildinformation erfasst wurde. Als Konsequenz daraus ergab sich jedoch, daß die Vergrößerungsmaßstäbe der Aufnahmen erheblich variieren. Daher muß man beim Vergleich sowohl von zusammengehörigem Transmissions- und Röntgenbild, als auch beim Vergleich von verschiedenen Bildern untereinander berücksichtigen, daß kein direkter Größenvergleich (etwa einzelner Knochenkerndurchmesser) vorgenommen werden darf. Aussagekräftig ist jedoch die Veränderung der relativen Knochengröße in einem Bild im Verhältnis zu einem anderen. Bei der Besprechung der folgenden Aufnahmen wird auf diesen Punkt jeweils eingegangen.



Aufnahme 3a:
Transmissionsbild der rechten
Hand (Junge, 2 Jahre 6 Monate)



Aufnahme 9b:
spiegelbildliches Röntgenbild der
selben Hand wie in Aufnahme 9 a

Aufnahmen 9 a und 9 b (Originalbilder: Seite 76))

Die Bilder stammen von der rechten Hand eines Jungen von 2 Jahren und 6 Monaten und stehen spiegelbildlich zueinander. Alle röntgenologisch dargestellten Knochen sind auch in der Transmissionsaufnahme abgebildet. Beim Größenvergleich muß berücksichtigt werden, daß die Fotos von Transmissionsbild und Röntgenaufnahme die Originalverhältnisse in verschiedenen Vergrößerungen wiedergeben.

Capitatum: Die relative Größe stimmt in beiden Bildern etwa überein. Die röntgenologische Knochenform stellt sich transmissionssonographisch ähnlich dar. Bei der Lage fällt auf, daß im Transmissionsbild der Abstand zum Metacarpale III kleiner erscheint als im Röntgenbild.

Hamatum: bildet sich in der Transmissionsaufnahme relativ größer als im Röntgenbild ab, wodurch sich auch die Formabweichungen erklären. Die Lage zum Capitatum korreliert zum Röntgenbild, während auch hier der Abstand zu den Metacarpalia IV und V kürzer zu sein scheint.

Radiusepiphyse: Annähernde Übereinstimmung in Form und queren Durchmesser (parallel zur Epiphysenfuge). Der Längsdurchmesser (in radialer Achsenrichtung) scheint transmissionssonographisch relativ größer zu sein.

Triquetrum: ist transmissionssonographisch relativ etwas größer als röntgenologisch. Lage und Form stimmen ziemlich gut überein.

Lunatum: Der verhältnismäßig kleine Kern bildet sich auch transmissionssonographisch deutlich erkennbar ab. Lage und runde Form entsprechen sich in beiden Bildern.

Sonstige Beurteilung: Radius und Ulna bilden sich in Form, Größe und Beziehung zueinander überraschend kongruent ab. Neben den vorhandenen Carpalia bilden sich transmissionssonographisch im Handwurzelbereich noch weitere Zonen ab, die vom Aspekt her knochendicht erscheinen. Davon liegen drei auf der ulnaren Seite des Capitatum zwischen Metacarpale II und Radiusepiphyse. Als vierte erkennt man eine zapfenförmige Ausziehung an der lateralen Kante der Ulna in Richtung Triquetrum. Röntgenologisch gibt es für diese vier Zonen kein Korrelat. Ein zufriedenstellender Vergleich bei den Metacarpalia ist wegen Unschärfen in der Transmissionsaufnahme nicht möglich. Der Gelenkflächenabstand bei den Fingergrundgelenken ist beim Strahl V gleich, beim Strahl IV transmissionssonographisch kleiner als röntgenologisch und bei den übrigen Strahlen transmissionssonographisch nicht beurteilbar.

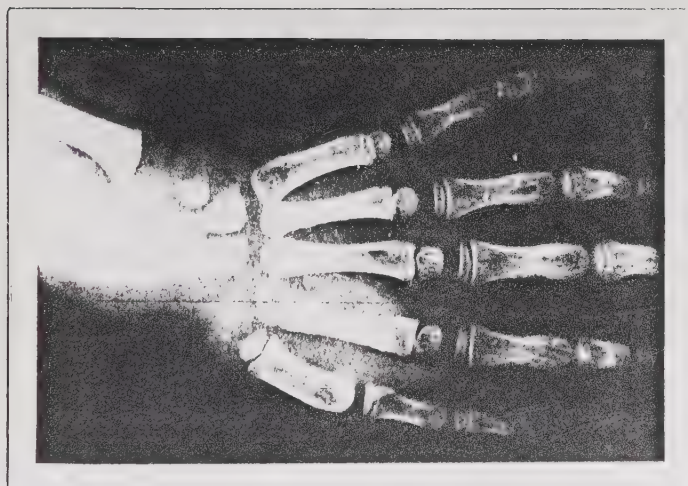
Aufnahmen 10 a und 10 b (Originalbilder: Seite 79)

Die zueinander spiegelbildlichen Aufnahmen stammen von der linken Hand eines Mädchens im Alter von 3 Jahren und 2 Monaten. Alle röntgenologisch dargestellten Knochen sind auch transmissionssonographisch erkennbar. Im Vergleich zu den Aufnahmen 9 a und 9 b ist die relative Größenzunahme der Skelettelemente im Bereich der Handwurzel und das zusätzliche Auftreten eines Knochenkerns in der Epiphyse des Metacarpale I festzustellen. Röntgenbild und Transmissionsbild weisen nicht den gleichen Abbildungsmaßstab auf.

Capitatum: stimmt in relativer Größe, Lage und Form gut mit den röntgenologischen Verhältnissen überein, steht jedoch transmissions-



Aufnahme I. b:
 spitzes Bild eines Röntgenbild der
 selben Hand wie in Aufnahme I. a



Aufnahme I. b:
 spitzes Bild eines Röntgenbild der
 selben Hand wie in Aufnahme I. a

sonographisch bereits in enger Beziehung zum Hamatum.

Hamatum: die relative Größe und Lage entspricht sich etwa in beiden Aufnahmen, von der Form her bestehen jedoch Unterschiede. Eventuell kann dies auf die unterschiedliche Armhaltung in beiden Bildern zurückgeführt werden (im Röntgenbild ist die Hand nach ulnar gehalten, im Transmissionsbild dagegen leicht nach radial).

Radiusepiphyse: Die röntgenologische Keilform lässt sich transmissionssonographisch nicht erkennen. Dort bildet sich die Epiphyse mit einem Schenkel parallel zum distalen Radiusende und mit einem weiteren Schenkel in 90° Stellung dazu in Richtung Metacarpale II ab. Insgesamt erscheint die Epiphyse dadurch transmissionssonographisch wesentlich größer als röntgenologisch.

Triquetrum: hat in beiden Aufnahmen etwa die gleiche relative Größe, stellt sich transmissionssonographisch jedoch nicht so gleichmäßig und rund dar wie im Röntgenbild. Die Lage stimmt bei beiden Aufnahmen etwa überein: das Triquetrum liegt auf der Verbindungslinie von der Mitte des Ulnaendes zur Mitte des Hamatums.

Lunatum: der röntgenologisch kleine Kern ist zwar im Transmissionsbild zu erkennen, jedoch bildet er sich nur als sehr kleine, dunkelgraue Zone ab, was ebenso gut einem der vielen anderen, dunklen Punkte ohne knöchernes Korrelat entsprechen könnte. Die Lage und das Alter der Probandin allerdings lassen unter normalen Umständen an dieser Stelle ein kleines Ossifikationszentrum erwarten.

Metacarpalepiphyse: Das Vorhandensein dieses Knochenkerns lässt sich im Bild nur daran erkennen,

daß sich die proximalen Enden der fünf Metacarpalia auf fast gleichem Niveau befinden. Bezüglich der Größe und Form kann kein Vergleich an- gestellt werden, da die Epiphyse sich im Transmissionsbild nicht separat abbildet.

Sonstige Beurteilung: Radius in beiden Aufnahmen etwa gleich scharf, Ulna transmissionssonographisch nur unscharf erfasst. Im Handwurzelbereich befinden sich transmissionssonographisch keine Zonen, die knochendichten Charakter haben und dadurch zu einer Fehlinterpretation führen könnten.

Aufnahmen 11 a und 11 b (Originalbilder: Seite 82)

Die beiden orientierungsgleichen Aufnahmen stammen von der linken Hand eines Jungen im Alter von 4 Jahren und 8 Monaten. Alle röntgenologisch dargestellten Knochen sind transmissionssonographisch ebenfalls erfaßt. Gegenüber den Aufnahmen 10 a und 10 b ist die relative Größenzunahme der Handwurzel- elemente zu erkennen. Neue Knochenzentren sind nicht aufgetreten.

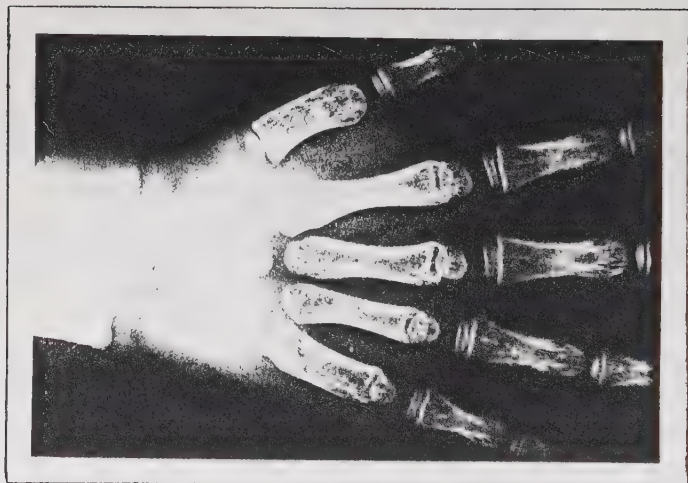
Capitatum: bildet sich bezüglich Größe und Lage in beiden Bildern ähnlich ab. Überraschend genau ist transmissionssonographisch die Form wieder- gegeben, welche derjenigen im Röntgenbild fast gleich ist. Trotz der nahen Lage zum Hamatum ist die räumliche Trennung eindeutig abgebildet.

Hamatum: In der Beziehung zum Umfeld, in der Größe und in der Form entsprechen sich die Darstellung des Hamatumkerns bei beiden Methoden. Die Kon- tur des Hamatums ist im Transmissionsbild weni- ger scharf als die des Capitatum.



Aufnahme 11a:

Transmissionsbild der linken
Hand (Junge, 4 Jahre 8 Monate)



Aufnahme 11b:

seitengleiches Röntgenbild der
selben Hand wie in Aufnahme 11a

Radiusepiphyse: das transmissionssonographische Vorhandensein der Radiusepiphyse steht außer Zweifel. Allerdings ist es schwierig, ihre Form und Größe genau zu bestimmen, da sie einerseits kaum vom Radiuschaft abgesetzt ist und andererseits ihre distale, seitliche Grenze durch mehrere, eng liegende, dunkle Zonen ohne Knochenkorrelat überdeckt wird. Klar zu sehen ist dagegen der sich keilförmig zur Ulna hin verschmälernde Anteil.

Triquetrum: es erscheint transmissionssonographisch als relativ zu groß. Dieser Eindruck entsteht dadurch, daß der Triquetrumkern bereits Kontakt zum Hamatumkern aufgenommen hat und sich verhältnismäßig weit zum Lunatum und zur Ulnaeipiphyse hin erstreckt. Die ulnarseitliche Kerngrenze ist durch einen dunklen, vom Ulnaschaftende nach distal ziehenden Zapfen überlagert und daher nicht beurteilbar. Im übrigen bildet sich das Triquetrum in der Form ähnlich rund wie im Röntgenbild ab.

Lunatum: Auch dieser Kern bildet sich transmissionssonographisch größer als röntgenologisch ab, so daß er die Fläche zwischen Triquetrum und Radius-epiphyse fast durchlaufend ausfüllt. Warum sich die Kerne von Triquetrum und Lunatum im Transmissionssbild disproportional größer als auf der Vergleichsröntgenaufnahme abbilden, kann vorläufig noch nicht erklärt werden.

Metacarpalepiphyse: sie ist am Transmissionssbild nicht zu bestimmen, jedoch weist die nach proximal konvexe Form des Metacarpale I darauf hin, daß sich hier ein rundliches Knochenzentrum befindet.

Sonstige Beurteilung: Radius- und Ulnaschaft sind in der Transmissionsaufnahme scharf abgebildet. Die Schaftenden stellen sich der Form nach wie im Röntgenbild dar. Multiple kleine dunkle Zonen im ganzen Handwurzelbereich ohne entsprechendes Korrelat eines Knochenkerns machen die Abgrenzung und Größenbestimmung der einzelnen Handwurzelknochen verhältnismäßig schwierig.

Aufnahmen 12 a und 12 b (Originalbilder: Seite 85)

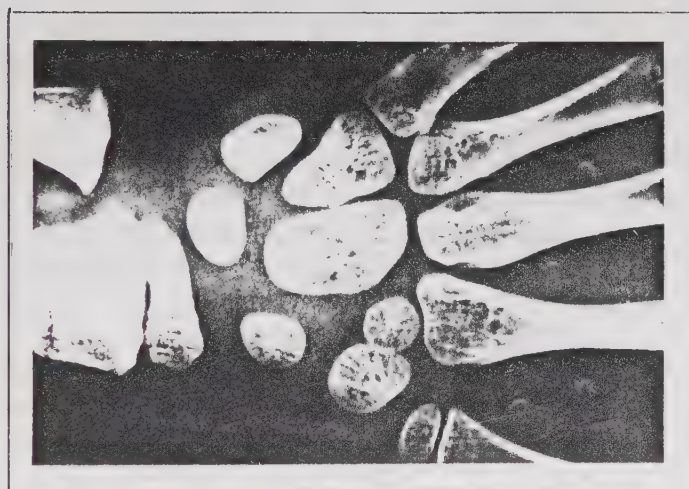
Die beiden orientierungsgleichen Bilder stammen von der linken Hand eines Mädchens im Alter von 6 Jahren und 7 Monaten. Die Zahl der abgebildeten Handwurzelknochen stimmt in beiden Aufnahmen überein. Im Unterschied zu den Aufnahmen 11 a und 11 b sind hier die Knochenkerne von Trapezium, Trapezoid und Scaphoid zu sehen. Die Schwierigkeiten, die sich beim Vergleich zwischen beiden Aufnahmen durch den stark unterschiedlichen Abbildungsmaßstab ergeben, waren nicht zu umgehen, da der schmale Bildausschnitt der Röntgenaufnahme keine andere Wiedergabe zuließ.

Capitatum: Auffällig ist die transmissionssonographische Konturunregelmäßigkeit auf der dem Trapezoid zugewandten Seite, vor allem die Verbindung zum Trapezoid hin. Auch für die beiden seitlichen Ausziehungen an der dem Lunatum benachbarten Fläche gibt es kein röntgenologisches Korrelat.

Hamatum: stellt sich relativ formgleich in beiden Aufnahmen dar. Transmissionssonographisch bemerkenswert ist die eindeutige Abgrenzbarkeit gegenüber dem Capitatum bei dem röntgenologisch kleinen Abstand beider Knochenkerne voneinander. Fast unmöglich ist dagegen die transmissionssonographische Abgrenzung gegenüber dem Triquetrum.



Aufnahme 12a:
 Textur des Gesteins, die die Struktur
 zeigt. (Mikroskop, 400-fache Vergrößerung)



Aufnahme 12b:
 Seitenbild des Ringes der
 selben Hand wie in Aufnahme 12a

Radiusepiphyse: Transmissionssonographisch ist keine Epiphysenfuge zu erkennen. Auch die sonst in diesem Alter noch zu sehende seitliche Einziehung in Höhe der Epiphysenfuge ist nicht dargestellt. Damit ist keine Aussage über die Radiusepiphyse möglich.

Triquetrum: Erscheint von der Größe und Lage in beiden Bildern ähnlich, in der Form bestehen dagegen Unterschiede. Auffallend ist, daß das Triquetrum transmissionssonographisch fast vollständig mit dem Hamatum verschmolzen ist. Im Röntgenbild ist im Gegensatz dazu ein ziemlich großer Abstand zwischen beiden Kernen abgebildet.

Lunatum: Größe und Lage stimmen in beiden Aufnahmen etwa überein. Auch hier besteht transmissionssonographisch ein sehr enger Kontakt zu dem Nachbarknochen, dem Capitatum und der Radiusepiphyse, so daß die Beurteilung der Form nicht ohne weiteres möglich ist.

Metacarpalepiphyse: ist transmissionssonographisch nicht zu erkennen. Unklar ist die Herkunft des dunklen Schattens, der Metacarpale I und Trapeium verbindet.

Trapezium: erscheint transmissionssonographisch als relativ zu groß, sowohl im Vergleich zu den übrigen Knochenkernen, als auch im Vergleich zur röntgenologischen Größe.

Trapezoid: bildet sich in Lage und Größe in beiden Bildern vergleichbar ab, ebenso in der Form, soweit diese frei zu erkennen ist. Die Verschmelzung mit dem Trapezoid entspricht sich in beiden Aufnahmen.

Scaphoid: Größe, Form und Abstand zum Radiusende beziehungsweise Caputatum stimmen in beiden Bildern überein. Die transmissionssonographische Ver-

schmelzung mit dem Trapezium widerspricht dem Röntgenbefund, wo ein breiter Abstand vorliegt. Eventuell kommt es zu diesem Effekt aufgrund der nicht erklärbaren, isolierten, transmissionssonographisch vergrößerten Abbildung des Trapezoids.

Sonstige Beurteilung: Beim Vergleich beider Aufnahmen fällt auf, daß im Transmissionsbild die Handwurzelknochen sehr eng beieinander liegen, so als ob die Handwurzel gleichsam zusammengestaucht wäre. Unter Umständen ist dies auf die Handhaltung während der Untersuchung am Ultraschallgerät zurückzuführen. Im Röntgenbild jedenfalls stellen sich die Kerne der proximalen Reihe alle separat und ohne irgendeinen Kontakt zu einem anderen Knochenzentrum dar.

Im Gegensatz zum Röntgenbild lassen sich die handwurzelnahen Epiphysen transmissionssonographisch nicht darstellen. Dagegen erscheint die Abbildung der Basen der Metacarpalia in beiden Aufnahmen gleich: Metacarpale I mit einem deutlichen Abstand zum Metacarpale II, welches wiederum ziemlich nahe am Metacarpale III heranreicht. Metacarpale III, IV und V liegen an der Basis so eng aneinander, daß sie transmissionssonographisch nicht voneinander getrennt werden können.

Aufnahmen 13 a und 13 b (Originalbilder: Seite 88)

Die zueinander spiegelbildlichen Aufnahmen stammen von der rechten Hand eines Jungen im Alter von 8 Jahren und 2 Monaten und sind im Abbildungsmaßstab etwa gleich. Für alle röntgenologisch erfassten Knochen gibt es entsprechende transmissionssonographische Bildkorrelate. Zum ersten Mal ist auf diesen Aufnahmen die Ulnaepiphyse zu sehen.

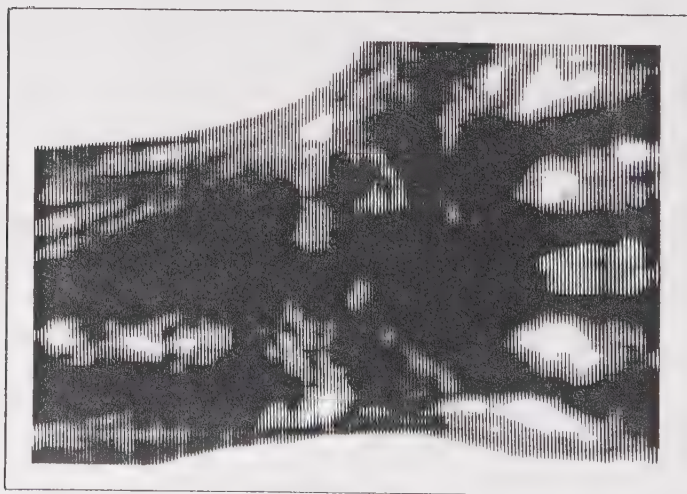


Abbildung 13a:
 Transmissionsbild der rechten
 Hand (Junge, 8 Jahre 2 Monate)

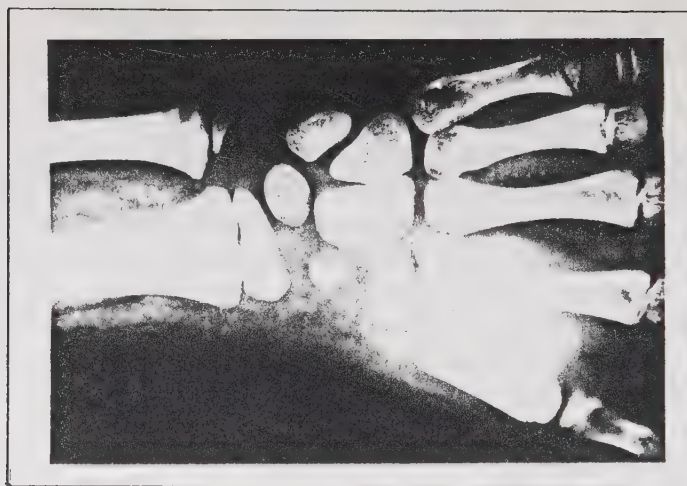


Abbildung 13b:
 spiegelbildliches Röntgenbild der
 selben Hand wie in Aufnahme 13a

Capitatum: kommt größengerecht über dem Metacarpale III zur Abbildung, zu dessen Gelenkfläche es nur auf der Daumenseite einen transmissionssonographisch erkennbaren Abstand hat. Auf der Kleinfingerseite dagegen kann das Capitatum weder gegen Metacarpale III beziehungsweise IV noch gegen das Hamatum abgegrenzt werden.

Hamatum: Die dichte Nachbarschaft zum Capitatum erklärt die transmissionssonographische Verschmelzung beider Knochenkerne. Unklar ist, warum der röntgenologisch klar erkennbare Abstand des Hamatum zu Metacarpale IV beziehungsweise V transmissionssonographisch nicht zur Darstellung kommt. Gegen das Triquetrum jedoch ist das Hamatum eindeutig abzugrenzen.

Radiusepiphyse: Anhand der beiden seitlichen Einziehungen kann die Radiusepiphyse sowohl im Röntgenbild als auch in der Transmissionsaufnahme bestimmt werden. Die radiologisch sichtbare Epiphysenfuge kommt jedoch transmissionssonographisch nicht zur Abbildung.

Triquetrum: transmissionssonographisch bildet sich das Triquetrum als schwarzer Bereich zwischen Hamatum und Ulnaende ab. Dabei ergibt sich die Schwierigkeit, die Kontur des Triquetrums vor allen Dingen zur Handkante hin genau abzugrenzen, da sich in diesem Bereich eine unklare dunkle Zone befindet, die jedoch kein Knochenkorrelat hat.

Lunatum: Größe, Lage und Form stimmen in beiden Aufnahmen etwa überein. Als Unterschied erkennt man, daß das Lunatum transmissionssonographisch sowohl mit der Radiusepiphyse als auch mit dem Capitatum verschmilzt sowie eine Kontaktstelle zum Triquetrum besitzt.

Metacarpalepiphyse: Auch transmissionssonographisch gelingt es, die Metacarpalepiphyse aufgrund der seitlichen Einziehungen gegen die Basis des Metacarpale I abzugrenzen.

Trapezium und Trapezoid: Die röntgenologisch fast gleich großen Knochen bilden sich transmissionssonographisch als deutlich unterschiedlich große Knochenzentren ab. Als Parallele zu Aufnahme 15 ergibt sich, daß wiederum das Trapezium transmissionssonographisch größer als röntgenologisch dargestellt ist. Außerdem ist es im Transmissionsschichtbild nicht möglich, Trapezium und Trapezoid voneinander zu trennen. Vielmehr stellen sich beide zusammen als keilförmige Zone dar.

Scaphoid: eine bildliche Übereinstimmung findet man nur in Bezug auf die Lage. Sowohl in Form als auch in Größe bestehen dagegen in beiden Aufnahmen Unterschiede. Transmissionssonographisch erscheint der Kern des Scaphoid größer als röntgenologisch. In der Form sind die Ähnlichkeiten zwischen der röntgenologischen und der transmissionssonographischen Abbildung sehr gering.

Ulnaepiphyse: Die röntgenologisch abgebildete Keilform der Ulnaepiphyse läßt sich transmissionssonographisch nicht ohne weiteres nachvollziehen. Jedoch scheint auch hier die Ulnaepiphyse in Form einer knopfartigen Ausziehung des unteren Ulnaschaftendes bildlich wiedergegeben zu sein.

Sonstige Beurteilung: Insgesamt handelt es sich transmissionssonographisch um eine verhältnismäßig übersichtliche Aufnahme. Es ist jedoch unbestritten, daß die Klarheit nicht mit dem Röntgenbild konkurrieren kann. Insbesondere scheint es fraglich, ob die Wiedergabe der Größenverhältnisse der einzelnen Handwurzelknochen

transmissionssonographisch exakt ist. Als Folge daraus ergibt sich, daß transmissionssonographisch oftmals mehrere Knochenzentren miteinander zu verschmelzen scheinen, obwohl im Röntgenbild ein deutlicher Abstand zwischen den einzelnen Knochenzentren zu erkennen ist.

I) DISKUSSION

Die Untersuchungsergebnisse haben gezeigt, daß es möglich ist, mit der Transmissionssonographie das kindliche Handwurzelskelett abzubilden.

In diesem Kapitel wird dargestellt, welche Aussagen dazu gemacht werden können, wo die Grenzen bei der Interpretation der Transmissionsbilder liegen und durch welche gezielten Maßnahmen diese Methode zu noch besseren Aufnahmen der kindlichen Handwurzel führen könnte.

Abbildung der Handwurzelknochen

Da sich mit der Transmissionssonographie sowohl Knochen als auch Weichteile abbilden lassen, sollten je nach Fragestellung die entsprechenden Strukturen optimal dargestellt werden. Neben einer ausreichend hohen Schallintensität empfiehlt es sich, für die Wiedergabe von Knochenelementen am Monitor eine mittlere Helligkeit und hohen Kontrast einzustellen.

Bei der transmissionssonographischen Beurteilung eines Knochens muß berücksichtigt werden, daß die Größe und Form des Knochens im Bild nur dessen Projektion in der Schnittebene entspricht. Will man eine Aussage etwa über die maximale Knochengröße oder die Form in einem bestimmten Bereich machen, dann muß die Schnittebene entsprechend eingestellt werden. Sollen mehrere Knochen in einer Aufnahme beurteilt werden, dann muß eine entsprechende Abbildungsebene gefunden werden, die die Knochenverhältnisse am besten wiedergibt.

Für die in den Transmissionsbildern der Handwurzel zu sehenden Knochenkerne wurde die Schnittebene so eingestellt, daß sie sich in ihrer größten Ausdehnung so scharf wie möglich abgebildet haben. Dabei darf aber nicht davon ausgegangen

werden, daß bei allen Knochenkernen die maximale Ausdehnung erfaßt wurde, wodurch sich auch die entsprechenden Abweichungen bezüglich Größe und Form beim Vergleich mit den entsprechenden Röntgenbildern erklären.

Eine Besonderheit der transmissionssonographischen Abbildungsmethode besteht im Gegensatz zum Röntgenverfahren darin, daß sich für jede beliebige Schnittebene die Handwurzelknochen in ihrer Lage untereinander beurteilen lassen. Hierin liegt letztendlich die Möglichkeit, durch standardisierte Aufnahmebedingungen ein verlässliches Bewertungsschema aufstellen zu können, mit dessen Hilfe transmissionssonographische Handwurzelaufnahmen von verschiedenen Probanden direkt miteinander verglichen werden können.

Ossifikationsverlauf und Skelettalter

Vergleicht man die transmissionssonographischen Handwurzelaufnahmen von Kindern unterschiedlichen Alters, so kann man folgendes zum Verlauf der Ossifikation feststellen:

Bei den jüngsten der untersuchten Kinder (knapp 2 Jahre) werden drei Knochenkerne im Handwurzelbereich erfaßt. Entsprechend der physiologischen Skelettreifung wächst die Zahl dieser Ossifikationszentren mit zunehmendem Alter weiter an. Mit etwa 9 Jahren sind dann alle elf Knochenkerne des Handwurzelbereichs transmissionssonographisch darstellbar. Damit bietet die jeweilige Anzahl der Handwurzelelemente mit einem Ossifikationszentrum die Möglichkeit einer groben Zuordnung zu einem bestimmten Altersbereich.

Hat ein Handwurzelelement einmal angefangen, sich knöchern umzuwandeln, dann unterliegt dieses Knochenzentrum einem fortschreitenden Größenwachstum, das transmissionssonographisch ebenfalls erfaßbar ist. Trotz der weiter oben beschriebenen Schwierigkeit, die Größe

genau zu beurteilen, kann deren Zunahme dazu herangezogen werden, um jedem einzelnen Ossifikationszentrum ein bestimmtes, altersbezogenes Entwicklungsstadium zuzuordnen. Mit Hilfe der beiden Parameter Anzahl und Einzelgröße der Handwurzelknochen dürfte es somit grundsätzlich möglich sein, das Skelettalter eines Kindes mittels einer transmissionssonographischen Handwurzel Aufnahme annähernd anzugeben.

Vergleich zwischen transmissionssonographischer und röntgenologischer Handwurzel Darstellung

Stellt man die Abbildungsergebnisse dieser beiden Methoden gegenüber, dann fällt bei den meisten Transmissionsbildern auf, daß dort in sehr wechselnder Häufigkeit schwarze, knochendicht erscheinende Bildanteile vorkommen, die kein röntgenologisches Knochenkorrelat haben. Als Ursache dafür können vermutlich Streuprozesse an nicht kalkdichten Strukturen angesehen werden. Durch Bewegen der Hand während mehrerer Aufnahmen konnten diese dunklen Bildszenen beliebig aufgehellt werden. Damit konnte nachgewiesen werden, daß es sich nicht um Knochenstrukturen handelt, die in jeder beliebigen Aufnahme zu einer schwarzen Abbildung geführt hätten.

Auch die Frage, mit welcher der beiden Methoden der Beginn der Ossifikation in den einzelnen Handwurzelknochen eher erfaßt werden kann, ist noch durch Untersuchungen mit entsprechend geeignetem Probandengut abzuklären. Bisher kann nur festgehalten werden, daß auch röntgenologisch kleine Knochenkerne im Transmissionsbild zu erkennen waren. Inwieweit allerdings für den transmissionssonographischen Nachweis des Ossifikationsbeginns die gleichen zeitlichen Regeldaten gelten wie für den röntgenologischen Nachweis, konnte bei der kleinen Probandenzahl nicht festgestellt werden.

Die Abweichungen, die beim Form- und Größenvergleich

zwischen den Abbildungen beider Methoden beobachtet werden können, sind weiter oben bereits diskutiert worden.

Aus der Notwendigkeit, transmissionssonographische Handwurzel-aufnahmen anders zu interpretieren als die entsprechenden Röntgenbilder, ergibt sich, daß für eine transmissionssonographische Bestimmung des Skelettalters die von der Röntgendiagnostik bekannten Beurteilungskriterien und Normwerte nicht direkt übernommen werden können, sondern den transmissionssonographischen Gegebenheiten angepaßt werden müssen.

Ausdehnung der Untersuchungen über die bisher bestehenden Altersgrenzen

Wie im vorangegangenen Kapitel bereits ausgeführt, gelang die Darstellung des Handwurzelbereichs bei Kindern nicht uneingeschränkt in jedem Alter. Die Begrenzung auf den Bereich zwischen etwa 2 und 12 Jahren wurde dabei im wesentlichen von den technischen Gegebenheiten des Laborgeräts bedingt.

Die untere Altersgrenze ergab sich aus der langen Zeitspanne von acht Sekunden für den Aufbau eines Einzelbildes. Je jünger die Kinder waren, umso geringer war ihre Kooperationsfähigkeit, die Hand lange genug ruhig zu halten, was bei den jüngsten Probanden wiederholt zum Abbruch der Untersuchung geführt hatte. Allerdings sollen bereits in naher Zukunft Änderungen an der Mechanik der Detektoreinheit des Laborgerätes die erforderliche Bildaufbauzeit deutlich auf etwa eine Sekunde verkürzen. Diese Weiterentwicklung wäre für einen routinemäßigen Einsatz der Transmissionssonographie - auch zu anderen Untersuchungen als der Handwurzel-darstellung - von grundlegender Bedeutung. Denn je schneller die Bildfolge, umso unabhängiger wird eine gute Organdarstellung

von der Kooperation des Patienten. Außerdem erweitert sich damit die Einsatzbreite der transmissionssonographischen Untersuchungsmethode, indem sie vom rein statischen Abbildungsverfahren zu einem annähernd dynamischen Untersuchungsverfahren wird. Bei der Darstellung des Handwurzelskeletts etwa könnte durch eine kontrollierte, wiederholte Veränderung der Handstellung eine Bilderfolge aufgezeichnet werden, die Rückschlüsse über die räumliche Anordnung der einzelnen Knochenelemente zuließe.

Auch die obere Altersgrenze ließe sich vermutlich erhöhen, wenn die Bildfolge am Transmissionsmonitor schneller wäre. Denn die im Alter von 11 bis 12 Jahren bereits sehr engen Abstände zwischen den einzelnen Handwurzelknochen können auf nur einer Aufnahme nicht ausreichend sicher beurteilt werden. Bei einer entsprechend kurzen Bildaufbauzeit wäre es möglich, innerhalb einer überschaubaren Untersuchungsdauer jede dieser Zwischenknöchelzonen gesondert darzustellen und damit den in der statischen Einzelaufnahme bereits flächenhaft verknöchert erscheinenden Handwurzelbereich noch weiter transmissionssonographisch differenzieren zu können.

Man kann davon ausgehen, daß ein Handwurzelskelett, dessen Verknöcherung mit 17 bis 19 Jahren abgeschlossen ist, transmissionssonographisch nicht mehr beurteilt werden kann. Nach der Verwirklichung der vorgenannten Änderungen am Laborgerät und der Untersuchungstechnik wird sich das Höchstalter für die transmissionssonographisch sichere Beurteilung und Auswertung einer Handwurzelaufnahme jedoch möglicherweise noch um einige Jahre über die bisherige Grenze von etwa 12 Jahren nach oben verschieben.

K) ZUSAMMENFASSUNG

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit der transmissionssonographischen Abbildung des kindlichen Handwurzelskeletts. Von Bedeutung war insbesondere die Darstellbarkeit der knöchernen Handwurzelemente. Die durchgeführten Untersuchungen sollten Aufschluß darüber geben, mit welcher Aussagekraft und innerhalb welcher Grenzen die Transmissionssonographie dazu eingesetzt werden kann.

Die Untersuchungen wurden an dem von der Gesellschaft für Strahlen- und Umweltforschung, Abteilung für angewandte Optik, entwickelten Transmissionssonographiegerät durchgeführt. Dieses arbeitet mit kontinuierlichem, inkohärenten Ultraschall bei einer Frequenz von ca. 2 MHz, welches sich - von piezokeramischen Sendern erzeugt - in einem mit Wasser gefüllten Becken ausbreitet. Dabei durchdringt er einen für das Einbringen von Untersuchungsobjekten vorgesehenen Bereich, tritt daraufhin durch ein Linsensystem und wird anschließend senkrecht an die Wasseroberfläche eines separaten Empfängerbeckens reflektiert. Im Kontakt zu dieser Wasseroberfläche tastet ein piezokeramisches Empfängerarray die Verteilung der Ultraschallintensität mit 200 Einzeldetektoren zeilenweise ab. Die Intensitätswerte für jeden Meßpunkt werden als elektrische Signale an ein Bildspeichergeät weitergeleitet, von dem aus die Wiedergabe als Grautonbild auf einem Fernsehmonitor über einen Rechner gesteuert wird.

Ein in das Ultraschallfeld eingebrachtes Objekt wird von den Ultraschallwellen durchdrungen, wobei die auftretenden Vorgänge der Absorption, Streuung und Reflexion zu einer partiellen, je nach Objektmaterial unterschiedlichen Schwächung der Intensität des Ultraschallfeldes führen. Die vom Empfänger gemessene Intensitätsverteilung führt zu einer Ab-

bildung, bei der eine senkrecht zur optischen Achse des Geräts orientierte Ebene des Objekts scharf auf dem Monitor wiedergegeben wird. Dabei erscheinen die in der Abbildungsebene erfaßten Weichteile wie Muskeln, Gefäße und Sehnen entsprechend ihren Transmissionseigenschaften in unterschiedlichen Helligkeitsstufen von hell - bis dunkelgrau. Im Gegensatz dazu wird Knochen, der wegen seiner fast vollständigen Ultraschallreflexion nur eine minimale Ultraschallintensität zum Empfänger gelangen läßt, schwarz abgebildet.

Im Zeitraum von Januar bis Dezember 1982 konnten von insgesamt 49 Kindern im Alter zwischen 2 und 16 Jahren über 200 Abbildungen des Handwurzelbereichs angefertigt werden. Die Geschlechtsverteilung war mit 26 Mädchen und 23 Jungen ausgewogen und der für die Auswertung als relevant festgelegte Altersbereich zwischen 2 und 12 Jahren war in etwa gleichmäßig abgedeckt. Bei 39 der 49 Probanden handelte es sich um gesunde, äußerlich normal entwickelte Kinder, die auf private Initiative hin für die Untersuchungen gewonnen werden konnten. Die restlichen 10 Kinder waren ebenfalls gesund, brachten aber eine aus klinischen Gründen angefertigte aktuelle Röntgenaufnahme der Hand mit. Daher war es möglich, bei diesem kleinen Teil der Probanden einen direkten Vergleich zwischen Transmissions- und Röntgenbild vorzunehmen. Bei der transmissionssonographischen Untersuchung der Probanden wurde versucht, jeweils mehrere Darstellungen beider Handwurzelbereiche aufzuzeichnen. Dabei sollten jeweils die distalen Enden beider Unterarmknochen, der Bereich der gesamten Handwurzel und die Metacarpalia I bis V erfaßt werden. Das Gerät wurde so eingestellt, daß sich die Knochenanlagen der acht Handwurzelelemente sowie der handwurzelnahen Epiphysen von Radius, Ulna und Metacarpale I scharf darstellten. Von den 39 Kindern ohne Röntgenaufnahmen wurde acht repräsentative Handwurzel Darstellungen für diese Arbeit ausgewählt. Von den zehn Kindern mit Röntgenbildern konnte in vier Fällen die Transmissionsaufnahme dem Röntgenbild gegenüberge-

stellt werden und mit diesem direkt verglichen werden. In allen Fällen erfolgte eine Beschreibung sowie eine Beurteilung mit Interpretation der transmissionssonographischen Abbildung.

Als Ergebnisse der durchgeführten transmissionssonographischen Untersuchungen und der daraufhin vorgenommenen Auswertung des Bildmaterials lassen sich folgende Feststellungen machen:

1. Die Knochenzentren der Handwurzelelemente und handwurzelnahen Epiphysen lassen sich transmissionssonographisch darstellen. Dabei bilden sie sich der Größe, Lage und Form nach etwa so ab, wie es vom entsprechenden Röntgenbild her vermutet werden kann.
2. Entsprechend der physiologischen Handskelettentwicklung steigt mit zunehmendem Alter die Zahl der transmissionssonographisch nachweisbaren Knochenkerne im Handwurzelbereich. So sind mit 2 Jahren drei, mit 5 Jahren zwischen sechs und neun und mit 8 bis 9 Jahren alle elf Ossifikationszentren darstellbar.
3. Jeder einzelne Knochenkern vollzieht ein Größenwachstum, das transmissionssonographisch verfolgt und beurteilt werden kann. Während beim Kind bis etwa 6 Jahren alle Knochenkerne der Handwurzel separat im Transmissionsbild abgegrenzt werden können, führt dieses fortschreitende Größenwachstum dazu, daß sich die einzelnen Knochenanlagen zunehmend annähern, bis sie beim Kind von etwa 12 Jahren kaum mehr zu differenzieren sind.

4. Es ist vorstellbar, daß das Skeletalter über die Anzahl und Größe der einzelnen Handwurzelelemente transmissionssonographisch so zuverlässig bestimmt werden kann, daß sich dieses Verfahren als allgemeine diagnostische Methode einsetzen ließe. Allerdings müßten dafür standardisierte Abbildungs- und Beurteilungskriterien erstellt werden.
5. Die Untersuchung des Handwurzelbereichs kann grundsätzlich bei Kindern jeden Alters durchgeführt werden. Aus technischen Gründen war es bisher kaum möglich, Kinder zu untersuchen, die deutlich jünger als 2 Jahre waren. Diese Einschränkung könnte jedoch schon in naher Zukunft durch eine Verkürzung der Bildaufbauzeit hinfällig werden. Durch diese Maßnahme würde sich auch die obere Altersgrenze von etwa 12 Jahren für eine noch aussagekräftige Darstellung der knöchernen Handwurzelelemente erhöhen, bis man die physiologische Grenze erreicht, bei der das fast abgeschlossene Größenwachstum der Handwurzelknochen eine transmissionssonographische Auflösung in einzelne Knochenelemente nicht mehr erlaubt.

Insgesamt besteht mit der Transmissionssonographie ein diagnostisches Verfahren, mit dem ohne Strahlenbelastung für Patient und Untersucher eine Aussage über den Ossifikationsgrad des Handwurzelskeletts gemacht werden kann. Aufgrund des hohen apparativen Aufwandes und der bislang noch sehr unsicheren Beurteilungsmöglichkeit transmissionssonographischer Handwurzelaufnahmen in Bezug auf die Bestimmung des Skeletalters bleibt es abzuwarten, ob sich die Transmissionssonographie zu einem praktikablen, medizinischen Untersuchungs- und Diagnostikverfahren für diese Fragestellung entwickeln wird.

L) LITERATURVERZEICHNIS

Unter den voranstehenden Ziffern wird im Text auf die entsprechende Literaturstelle verwiesen.

- 01 Brettel H., U. Röder, C. Scherg

Ultrasonic Transmission Camera for Medical Diagnosis

Biomedizinische Technik

26 / 1981 / 63

- 02 Brettel H., C. Scherg, U. Röder, W. Waidelich

Inkohaerente Ultraschall - Transmissionskamera

In: Kratochwil A., E. Reinhold

Ultraschalldiagnostik 1981, Dreihunderttreffen Graz

Thieme, Stuttgart - New York

1982 / 43 - 45

- 03 Dobrinski W., H. Kremer

Physikalische und technische Grundlagen des

Impuls - Echo - Verfahrens

In: Kremer H.

Sonographische Diagnostik Innerer Erkrankungen

Urban & Schwarzenberg, München - Wien - Baltimore

1982 / 1 - 7

- 04 Frick H., H. Leonhard, D. Starck

Allgemeine Anatomie, Spezielle Anatomie I

Thieme, Stuttgart - New York

1977 / 270 - 283

- 05 Green P. S.

A New High - Performance Ultrasonic Camera

In: Green P. S., L. F. Schaefer, E. D. Jones, J. R. Suarez
Acoustical Holography
Plenum Press, New York
5 / 1974 / 493 - 503

- 06 Green P. S.

Orthographic Transmission Imaging

In: Wells P. N. T., M. C. Ziskin
New Techniques and Instrumentation in Ultrasonography
Churchill Livingstone, New York - Edinburgh - London
1980 / 123 - 143

- 07 Greulich W. W., S. I. Pyle

*Radiographic Atlas of Skeletal Development of
the Hand and Wrist*

Stanford University Press, Stanford/California
2/1976

- 08 Havlice J. F., P. S. Green, J. C. Taenzer, W. F. Mullen

*Spatially and Temporally Varying Insonification
for the Elimination of Spurious Detail in Acoustic
Transmission Imaging*

7th International Symposium on Acoustical Imaging
and Holography Chicago, Illinois, 30.8. - 1.9.1976

- 09 Hassler D.

Grundlagen des Ultraschalls

In: Krestel E.
Bildgebende Systeme für die medizinische Diagnostik
Siemens Aktiengesellschaft, Berlin - München
1980 / 100 - 139

- 10 Heyser R. C., D. H. le Croisette
A New Ultrasonic Imaging System Using Time Delay Spectrometry
Ultrasound in Medicine and Biology
1 / 1974 119 - 131
- 11 Kremer H., H. Brettel, C. Scherg, M. A. Schreiber,
W. Waidelich, N. Zöllner,
Transmission Ultrasonography in the Skeletal Development of the Hand
In: Lerski R.A., P. Morley
Ultrasound '82
Pergamon Press, Oxford - New York - Toronto
1983 / 219 - 222
- 12 Kremer H., U. Rüder, H. Brettel, W. Dobrinski,
C. Scherg, W. Waidelich, N. Zöllner
Transmissionssonographische Diagnostik der Extremitäten
In: Kratochwil A., E. Reinold
Ultraschalldiagnostik 1981, Dreihunderttreffen Graz
Tieme, Stuttgart - New York
1982 / 46 - 47
- 13 Lutz H., R. Meudt
Ultraschallfibel
Springer, Berlin - Heidelberg - New York
1981 / 3 - 8
- 14 Marich K. W., L. M. Zatz, P. S. Green, J. R. Suarez,
A. Macovski
*Realtime Imaging with a New Ultrasonic Camera,
Part I: In-Vitro Experimental Studies on Transmission
Imaging of Biological Structures*
Journal of Clinical Ultrasound
3 / 1975 / 5 - 16

- 15 Röder U., C. Scherg
*Scattered Ultrasound for Incoherent Insonification
in Transmission Imaging*

Ultrasonics
1980 / 273 - 276
- 16 Röder U., C. Scherg, H. Brettel
Coherence and Noise in Ultrasonic Transmission Imaging

In: Alais P., A. F. Metherell
Acoustical Imaging
Plenum Publishing Corporation
10 / 1982 / 131 - 142
- 17 Scherg C., H. Brettel, U. Röder, W. Waidelich
Transmission Imaging with Incoherent Ultrasound

In: Bally G. von P. Greguss
Springers Series in Optical Sciences
Springer, Berlin - Heidelberg - New York
31 / 1982 / 82 - 85
- 18 Schmid F., H. Moll
*Atlas der normalen und pathologischen Hand-
skelettentwicklung*

Springer, Berlin - Göttingen - Heidelberg
1960 / 7 - 12, 48 - 50, 84 - 91
- 19 Sobotta J., H. Becher
Atlas der Anatomie des Menschen, 1. Teil

Urban & Schwarzenberg, München - Berlin - Wien
16 / 1967 / 42 - 43

- 20 Suarez J. R., K. W. Marich, J. F. Holzemer,
J. S. Taenzer, P. S. Green

Biomedical Imaging with the SRI Ultrasonic Camera

In: Booth N.
Acoustical Holography
Plenum Press, New York - London
6 / 1975 / 1 - 13

- 21 Swoboda W.

Das Skelett des Kindes

Thieme, Stuttgart - New York
2 / 1969 / 26 - 32, 120 - 123, 258 - 259

- 22 Stiefenhofer B., H. Kremer, H. Brettel, R. Denk,
W. Waidelich

*Transmissionssonographische Befunde über die knöch-
erne Entwicklung des kindlichen Handskeletts*

In: Otto, R. C., F. X. Jann
Ultraschalldiagnostik 1982
Drei - Länder - Treffen Bern
Thieme, Stuttgart - New York
1983 / 422 - 424

- 23 Wells P. N. T.

Transmission Methods

Biomedical Ultrasonics
Academic Press London - New York - San Francisco
1977 / 399 - 415

- 24 Wells P. N. T.

History

In: Vlieger M. de, J. H. Holmes, E. Kazner, G. Kossoff,
A. Kratochwil, R. Kraus, J. Poujol, D. E. Strandness
Handbook of Clinical Ultrasound
John Wiley & Sons, New York - Chicester - Toronto
1978 / 3 - 14

- 25 Wells P. N. T.

Basic Physics

In: Vlieger M. de, J. H. Holmes, E. Kazner, G. Kossoff,
A. Kratochwil, R. Kraus, J. Poujol, D. E. Strandness
Handbook of Clinical Ultrasound
John Wiley & Sons, New York - Chicester - Toronto
1978 / 15 - 23

- 26 Zatz L. M., K. W. Marich, P. S. Green,
J. R. Suarez, A. Macovski

*Realtime Imaging with a New Ultrasonic Camera,
Part II: Preliminary Studies in Normal Adults*

Journal of Clinical Ultrasound
3 / 1975 / 17 - 22

LEBENS LAUF

- 1958 Am 28.10.1958 in München geboren als Sohn
von Dr. jur. Alfred Stiefenhofer und
Renate Stiefenhofer, geb. Sladek
- 1965 - 1969 Grundschule München, Wittelsbacherstraße
- 1969 - 1978 Gymnasium Pullach
- 1975 Sprachkurs in Southampton/England
- 1977 Facharbeit im Rahmen der Kollegstufe
Thema: Bau eines Spirometers, Durchführung
von Meßreihen und Auswertung der Ergebnisse
- 1978 Erwerb der allgemeinen Hochschulreife sowie
eines Stipendiums nach Artikel 10, Absatz 1
des Bayerischen Begabtenförderungsgesetzes
- 1978 - 1984 Studium der Medizin an der LMU München
- 1980 Physikum im August
- 1981 1. Staatsexamen im August
- Famulaturen:
- | | |
|---------------------|----------------------------|
| Dr. med. Seele | Niedergelassener Internist |
| Prof. Dr. Rudolph | Deutsches Herzzentrum |
| Dr. med. Seele | Niedergelassener Internist |
| Prof. Dr. Spelsberg | Krankenhaus Martha Maria |
- 1983 2. Staatsexamen im August
- Praktisches Jahr:
- | | |
|----------------|---------------------------|
| Chirurgie | Zentralklinikum Augsburg |
| Wahlfach | Kinder-Poliklinik München |
| Innere Medizin | Innere Poliklinik München |
- 1984 3. Staatsexamen im Oktober
- Approbation im Oktober
- Rigorosum im November

Herzlich möchte ich mich bei allen bedanken, die durch ihre Hilfe und Unterstützung am Zustandekommen dieser Arbeit beteiligt waren.

Herrn *Professor Dr. med. N. Zöllner* danke ich für die Überlassung des Themas und für die Möglichkeit, die Dissertation an der Medizinischen Poliklinik der Universität München durchzuführen.

Herr *Dr. med. H. Kremer* arbeitete mich in die Thematik ein und war während der gesamten Durchführung ein wertvoller Gesprächspartner. Mein besonderer Dank gilt ihm für die Gelegenheit, die Ergebnisse dieser Arbeit beim Ultraschallkongreß in Bern 1982 vortragen zu dürfen sowie für die Gesamtdurchsicht des Manuskripts.

Herr *Professor Dr. rer. nat. W. Waidelich* von der Gesellschaft für Strahlen- und Umweltforschung (GSF) in Neuherberg ermöglichte mir die Benutzung des dort entwickelten Transmissionssonographiegerätes.

Die Herren *Dr. rer. nat. H. Brettel, R. Denk* und *C. Sohrg* von der Abteilung Angewandte Optik der GSF Neuherberg betreuten mich während aller Arbeiten mit dem Transmissionssonographiegerät. Bei ihnen möchte ich mich für die bereitwillige Unterstützung, die anregenden Diskussionen und fachbezogenen Ratschläge sowie die kritische Durchsicht des physikalisch - technischen Manuskriptteils besonders bedanken.

München, Februar 1984

Bernd Stiefenhofer

